ORSAY
n° d'ordre : 3244

UNIVERSITE DE PARIS-SUD
CENTRE D'ORSAY

THESE

présentée

pour obtenir

le TITRE de DOCTEUR 3e CYCLE
Spécialité : PHYSIQUE NUCLEAIRE

par

THEROND Patrice

CONTRIBUTION A LA QUALIFICATION D'UN SCHEMA DE CALCUL POUR LES REACTEURS A EAU PRESSURISEE, APPLIQUE A DES ABSORBANTS A BASE DE GADOLINIUM ET DE HAFNIUM

Soutenue le 18 juin 1982 devant la Commission d'Examen

MM. HERPIN Président
CHABRILLAC
DELAYRE
MONDOT
VIDAL

ORSAY
n° d'ordre : 3244

UNIVERSITE DE PARIS-SUD
CENTRE D'ORSAY

T H E S E

présentée

pour obtenir

le TITRE de DOCTEUR 3e CYCLE
Spécialité : PHYSIQUE NUCLEAIRE

par

THEROND Patrice

CONTRIBUTION A LA QUALIFICATION D'UN SCHEMA DE CALCUL POUR LES REACTEURS A EAU PRESSURISEE, APPLIQUE A DES ABSORBANTS A BASE DE GADOLINIUM ET DE HAFNIUM

Soutenue le 18 juin 1982 devant la Commission d'Examen

MM.	HERPIN	Président
	CHABRILLAC	
	DELAYRE	
	MONDOT	
	VIDAL	

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

REMERCIEMENTS

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur HERPIN, Professeur à Paris VI, et à Monsieur VIDAL, Chef de Département au CEA, d'avoir présidé et dirigé cette thèse.

Je remercie Monsieur MONDOT, Ingénieur au CEA, pour son aide qui m'a permis d'effectuer ce travail.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du Service d'Etude Nucléaire et plus particulièrement aux membres du Laboratoire de Propulsion Navale pour les précieux conseils qu'ils n'ont jamais manqué de me donner tout au long du déroulement de ma thèse.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543523_0025

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : PRESENTATION DU SCHEMA DE CALCUL	3
I Généralités	3
II Différents types de codes	5
CHAPITRE II : INTERPRETATION D'EXPERIENCES RELATIVES A DES POISONS CONSOMMABLES GADOLINIES	10
INTRODUCTION	10
Quelques propriétés physiques	11
A - INTERPRETATION DES EXPERIENCES "AZUR-CARAMEL" RELATIVES AUX LATTES D'ALUMINE GADOLINIEES	12
I Présentation des essais	12
II Méthode de calcul	17
III Configuration de référence	22
IV Configuration avec latte d'alumine gadoliniée	26
V Analyse des résultats	33
B - INTERPRETATION DES EXPERIENCES "AZUR-CAP 1800" RELATIVES AUX CRAYONS D'UO_2 - Gd_2O_3	34
I Présentation des essais	34
II Méthode de calcul	40
III Bibliothèque utilisée	44
IV Configuration de référence	51
V Configuration avec poisons sans intéraction	54
VI Configuration avec poisons en intéraction	61
VII Analyse des résultats	65
C - INTERPRETATION DES EXPERIENCES "AZUR-CAP 1800" RELATIVES AUX CRAYONS D'UO_2 - Gd_2O_3 PAR UN CALCUL DE TRANSPORT	67
I Constitution de la bibliothèque	68
II Résultats	72
III Analyse des résultats	78
CONCLUSION DU CHAPITRE	80

CHAPITRE III : INTERPRETATION D'EXPERIENCES RELATIVES A DES ABSORBANTS HAFNIES 81

INTRODUCTION 81

Quelques propriétés physiques 82

A - INTERPRETATION DES EXPERIENCES "AZUR-CARAMEL II" RELATIVES AUX LATTES DE HAFNIUM 86

I Présentation des essais 86

II Méthode de calcul 89

III Calculs préliminaires 90

IV Sections efficaces du hafnium 100

V Configuration de référence 109

VI Configuration avec le rideau de hafnium de 5 mm 109

VII Configuration avec le rideau de hafnium partiellement enfoncé 114

VIII Configuration avec des rideaux d'épaisseurs différentes et avec lame d'eau interne 117

IX Analyse des résultats 120

B - INTERPRETATION DES EXPERIENCES "AZUR-CAP 1800" RELATIVES AUX CRAYONS DE HAFNIUM 122

I Présentation des essais 122

II Méthode de calcul 127

III Bibliothèque utilisée 128

IV Configuration de référence 128

V Configuration avec poisons sans intéraction 128

VI Configuration avec poisons en intéraction 138

VII Configuration avec poisons couplés 139

CONCLUSION DU CHAPITRE 146

CONCLUSION GENERALE 147

INTRODUCTION

Le calcul neutronique des réacteurs nucléaires nécessite l'utilisation de codes informatiques très perfectionnés qui, à partir des données fondamentales que sont les bibliothèques de sections efficaces, doivent conduire à la restitution précise des phénomènes physiques intervenant dans un coeur de réacteur.

Dans la réalité, le système d'équations qui régit le comportement d'un réacteur n'est jamais résolu directement par un seul outil informatique. La complexité du problème amène le physicien à simplifier le traitement par des hypothèses de découplage des différents effets.

Dans la pratique, ceci se traduit par l'utilisation de plusieurs programmes ou modules dont l'enchaînement constitue ce que l'on appelle un schéma de calcul.

Encore faut-il préciser que chacun des programmes comporte différentes options qui correspondent à des modèles de calcul plus ou moins sophistiqués.

La précision des calculs neutroniques est donc fonction à la fois de l'incertitude sur les données de base et du formalisme utilisé pour représenter les phénomènes physiques.

L'effort de développement consenti depuis de nombreuses années au CEA nous a permis de disposer d'un ensemble d'outils très perfectionnés.

Un des aspects les plus importants de la physique des réacteurs reste alors la qualification des schémas de calcul. Pour une situation donnée, il faut en déterminer le mode d'emploi le mieux adapté compte tenu du coût et de la précision souhaitée.

Parmi les nombreux problèmes pour lesquels le test des codes dont nous disposons est en cours, un des plus urgents concerne la prise en compte d'hétérogénéités absorbantes dans les réseaux de réacteurs à eau. Plus précisément, nous avons abordé dans le cadre de ce travail la qualification des calculs de réseaux contenant des absorbants à base de Hafnium et de Gadolinium.

Le Hafnium est un matériau couramment utilisé comme moyen de contrôle dans les réacteurs à plaques. Il importe donc de bien connaître la précision avec laquelle on calcule son efficacité. Il a longtemps été utilisé conjointement avec le bore sous la forme de poison consommable dilué dans le gainage du combustible pour compenser l'exédent de réactivité initial et réduire le contrôle mobile.

Pour des raisons souvent éloignées de la neutronique, on envisage depuis peu le remplacement de ce mode de contrôle par des poisons à base de Gadolinium. Dans le même temps, le désir d'allonger la durée de cycle des réacteurs électrogènes renforce l'intérêt que l'on porte actuellement à ce type d'absorbant.

La démarche choisie pour qualifier le calcul de ces hétérogénéités absorbantes est l'interprétation d'expériences critiques.

On distinguera deux types d'expériences :

- Pour les réseaux à plaques, plusieurs programmes d'essai ont été conçus spécialement pour tester les calculs, partant de situations très simples à une dimension et s'orientant progressivement vers des configurations réalistes à deux et trois dimensions.
  Nous avons interprété dans le cadre de cette thèse la partie des essais de ce type réalisés à ce jour.

- Pour compléter l'information ainsi obtenue, nous avons dépouillé en parallèle des expériences réalisées sur un réseau à barreau de type PWR 17 x 17 contenant le même type d'absorbant.

La diversité des configurations rencontrées a permis le test de la plupart des codes et options de calcul utilisés actuellement au C.E.A. pour les réseaux de réacteur à eau en début de vie et à froid contenant des hétérogénéités absorbantes à base de hafnium et de Gadolinium.

CHAPITRE I

PRESENTATION DU SCHEMA DE CALCUL

I GENERALITES

Nous savons que la population neutronique d'un réacteur est régie de manière exacte par l'équation de Boltzmann. La complexité des phénomènes neutroniques intervenant dans un réacteur interdit, compte tenu des limites informatiques actuelles, que l'on résolve directement à trois dimensions et sur l'ensemble du réacteur l'équation de Boltzmann.

Pour rendre le problème soluble, la démarche couramment utilisée consiste à simplifier en ne traitant que des problèmes stationnaires et en considérant des chocs isotropes (sauf pour le calcul du coefficient de diffusion qui est fait dans l'approximation B1). Ainsi nous avons une équation indépendante du temps et de la variable angulaire. Cette équation ne va plus dépendre, pour un problème à température constante, que de l'espace et de l'énergie qui sont deux variables couplées.

La méthode utilisée pour résoudre l'équation est en général la discrétisation des variables espace et énergie.

. Variable espace
Le calcul du coeur est réalisé à l'aide d'un modèle approximatif, la théorie de la diffusion, qui ne permet pas de prendre en compte correctement les hétérogénéités fines. Avec une telle méthode le coeur doit être constitué de zones homogènes qui seront caractérisées par une section efficace macroscopique telle que :

$$\overline{\Sigma}(E) = \frac{\int \Sigma(r,E)\,\varphi(r,E)\,dr}{\int \varphi(r,E)\,dr}$$

$\varphi(r,E)$: structure fine du flux

. Variable énergie
La restitution des variations des sections efficaces en fonction de l'énergie nécessiterait une discrétisation en plusieurs milliers de groupes, d'où des calculs très lourds.
La procédure retenue pour alléger les calculs consiste à utiliser des sections efficaces auto-protégées, ce qui conduit à des bibliothèques de données de bases à environ une centaine de groupes.

Le coeur traité en théorie de la diffusion, l'est à peu de groupes (2 ou 4). Nous devons disposer, pour chacun des milieux du coeur, d'une section efficace macroscopique telle que :

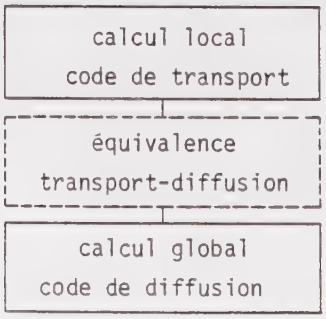
$$\overline{\Sigma}_{\Delta E}(r) = \frac{\int \Sigma(r,E)\,\varphi(r,E)\,dE}{\int \varphi(r,E)\,dE}$$

Nous voyons que le calcul du coeur va être précédé par une étape d'homogénéisation et de condensation des sections efficaces. Comme nous l'avons vu, pour condenser et homogénéiser les sections efficaces nous devons connaître le flux $\varphi(r,E)$ qui ne peut être déterminé que par le calcul de coeur lui-même.

Pour résoudre le problème, on cherche à approcher le flux $\varphi(r,E)$ par un flux $\tilde{\varphi}(r,E)$. Le calcul du flux $\tilde{\varphi}(r,E)$ se fera par un traitement local effectué sur une géométrie beaucoup moins étendue que celle du coeur et représentant les différentes zones de ce dernier. Le calcul local se fait en considérant que le motif traité se répète par symétrie de manière infinie. On traite ainsi l'ensemble des phénomènes physiques (absorption, ralentissement, thermalisation, ...) avec le maximum de soin au sein d'une maille élémentaire, d'une cellule, ou d'un assemblage où toutes les hétérogénéités sont prises en compte. Ces calculs seront faits en théorie du transport et fourniront ainsi les paramètres synthétisant les propriétés locales du réacteur et leurs variations.

Nous devons retrouver avec le calcul de diffusion les résultats du calcul transport ; dans le cas d'un réseau uniforme l'homogénéisation ne pose aucune difficulté puisqu'il suffit d'une pondération des différentes sections efficaces par les volumes et les flux fins du calcul de cellule pour obtenir des paramètres nucléaires utilisables dans le calcul global du coeur. Cette procédure est mise en défaut lorsque l'on cherche à homogénéiser, cellule par cellule, un assemblage de réacteur à eau. Nous devons passer par une étape intermédiaire qui est l'équivalence transport-diffusion.

Les différentes phases du calcul d'un réacteur sont résumées dans le tableau suivant :



II DIFFERENTS TYPES DE CODES

2.1 Codes de diffusion

Rappelons l'équation de la diffusion

$$D^i \Delta\phi^i - \Sigma_t{}^i \phi^i + S^i = \frac{1}{Vi} \frac{\partial \phi^i}{\partial t} \quad \text{pour le groupe i}$$

$$S^i = \chi^i \nu^j \Sigma_f{}^i \phi^i + \sum_J \Sigma_{rj \to i} \phi^j$$

$$\Sigma_t{}^i = \Sigma_a{}^i + \sum_J \Sigma_{ri \to j}$$

avec D : coefficient de diffusion.
Σ_a, Σ_f : sections efficaces macroscopiques d'absorption et de fission.
χ^i : proportion de neutrons de fission émis dans le groupe i.
Σ_r : section efficace macroscopique de transfert.

Cette équation peut être résolue en régime permanent par la méthode des éléments finis ou des différences finies.

Lorsqu'il n'existe pas d'hétérogénéité axiale, elle sera résolue à deux dimensions, l'introduction d'un laplacien axial B^2_z simulant les fuites axiales. Pour cela nous disposons dans le système Neptune [1] utilisé au C.E.A. des codes Diane (différences finies) et Bilan (éléments finis).

Le traitement à trois dimensions de cette équation peut être fait à l'aide du code Trident (éléments finis). Pour prendre en compte des hétérogénéités axiales de manière moins coûteuse, on dispose de code utilisant une méthode de synthèse spatiale ; il s'agit des codes Icare (différences finies) et Syfèm (éléments finis).

2.2 Codes de transport

L'équation de Boltzmann peut être mise sous forme intégro-différentielle ou sous une forme totalement intégrale. Nous aurons en régime stationnaire

$$- \vec{\Omega} \times \overrightarrow{\text{grad}}\, \phi(\vec{r},u,\vec{\Omega}) - \Sigma_t\,(\vec{r},u,\vec{\Omega}) \times \phi(\vec{r},u,\vec{\Omega})$$
$$+ \int_0^\infty du' \int_{4\pi} d^2\Omega' \times \Sigma_s(\vec{r},u' \to u,\vec{\Omega}' \to \vec{\Omega}) \times \phi(\vec{r},u',\vec{\Omega}')$$
$$+ S\,(\vec{r},u,\vec{\Omega}) = 0$$

pour la forme intégro-différentielle

$$\phi(\vec{r},u,\vec{\Omega}) = \int_0^{\infty} e^{-\tilde{\Sigma}_t s} \times q\,(\vec{r}-s.\vec{\Omega},u,\vec{\Omega}) \times ds$$

$$q(\vec{r},u,\vec{\Omega}) = \int_{4\pi} \Sigma_s\,(\vec{r},u,\vec{\Omega}'.\vec{\Omega})\ \phi(\vec{r},u,\vec{\Omega}')\ d^2\Omega' + S(\vec{r},u,\vec{\Omega})$$

et $\tilde{\Sigma}_t s = \int_M^A \Sigma_t(\vec{r})\ ds$ (parcours optique)

pour la forme intégrale

Pour résoudre ces équations l'approximation multigroupe est utilisée pour la variable léthargie u : toutes les particules d'énergie comprise dans un intervalle donné sont supposées intéragir avec la matière en fonction de sections efficaces moyennées sur l'intervalle considéré.

Les principaux codes utilisés pour résoudre l'équation du transport sont Dot [2] et Apollo [3] (du système Neptune [1]).

2.2.1 Le code Dot

Le code Dot résout l'équation du transport sous la forme intégro-différentielle par la méthode S_N qui s'apparente à la méthode des ordonnées discrètes et à celle des éléments finis.

Les géométries traitées sont à deux dimensions XY, RZ,Rθ. L'équation du transport est approximée en représentant la variable angulaire par un jeu de directions discrètes auxquelles des poids sont attribués qui représentent l'angle solide associé à chaque direction. Toutes les particules comprises dans un angle solide sont traitées comme si elles circulaient suivant la direction discrète associée.

Chaque dimension spatiale est divisée en intervalles et le bilan des neutrons est établi en tenant compte des fuites, des sources et des taux de réaction dans chaque maille élémentaire à deux dimensions ainsi définie.

Les équations qui relient les flux aux bornes de la maille espace-angle au flux au centre de la maille sont les équations "diamant" qui utilisent l'approximation suivante : le flux en phase sera linéaire suivant les deux variables spatiales et la variable angulaire.

2.2.2 Le code Apollo

Le code Apollo résout l'équation du transport sous sa forme intégrale par la méthode des probabilités de collision avec les deux possibilités suivantes :

. probabilités "anisotropes" (choc linéairement anisotropes)
. probabilités "isotropes" (choc isotrope)

Apollo traite les problèmes à une dimension plane, cylindrique ou sphérique, le nombre de groupes d'énergie généralement utilisé étant de 99. Le traitement pour tous les groupes est identique sauf pour les groupes thermiques ($E < 2{,}76$ eV) où l'on calcule les remontées en énergie.

Le traitement du domaine résonnant est très particulier, en effet bien que très détaillé pour la description du spectre, le découpage multigroupe n'est pas suffisamment fin pour permettre de décrire les nombreuses résonances des noyaux lourds. On introduit des sections multigroupes auto-protégées, en faisant une équivalence entre le cas hétérogène étudié et un cas homogène pour lequel on a effectué une tabulation des sections effectives.

Le coefficient de diffusion est calculé en général dans l'approximation B1 sur l'ensemble des milieux homogénéisés. Il existe dans Apollo un module permettant de traiter les géométries à deux dimensions. Le module Marsyas [3] effectue un véritable calcul des probabilités de collisions de premier choc Pij à deux dimensions par intégration numérique sur des pas variable en espace Δr et en angle $\Delta\varphi$. Cette méthode très coûteuse ne permet pas de traiter des géométries très étendues (limitation en nombre de points de calcul).

Apollo permet d'effectuer des calculs pseudo 2 dimensions, qui sont beaucoup moins chers. Ils sont basés sur la méthode des courants d'interface qu'utilise les différentes options multicellules du code Apollo. Nous rappelons brièvement les hypothèses de cette approximation.

Le but d'un calcul multicellule est de tenir compte, au moins de façon approximative, des intéractions entre cellules. Considérons un réseau régulier constitué par exemple de cellules de deux types différents, représenté ci-dessous.

A	B	A	B
B	A	B	A
A	B	A	B
B	A	B	A

Soit : P_{ij}^{+} probabilité de premier choc sans sortie de la cellule d'origine (calculée par le sous programme de calcul des probabilités de premier choc dans une cellule, Alcoll).

$P_{is}^{A} = 1 - \sum_{i'} P_{ii'}^{A}$ probabilité qu'un neutron né dans le milieu i de la cellule de type A sorte de cette cellule sans choc.

$P_{s\,j}^{A}$ probabilité, pour un neutron entrant dans une cellule de type A, de subir un choc dans le milieu j de cette cellule sans en ressortir.

Les cellules sont décomposées en zones homogènes et une matrice de probabilités de collision est calculée pour chaque cellule en faisant l'approximation du flux plat dans les zones ; ensuite, en faisant des approximations sur le couplage neutronique des cellules, on construit une matrice globale de probabilités de collision pour la multicellule. Le couplage entre les cellules s'obtient en faisant une double approximation sur le comportement spatial et angulaire des flux angulaires entrant et sortant de chaque cellule.

On peut donc écrire :

$$\left.\begin{aligned} \phi &= P_{.S}\, J_- + P\, F \\ J_+ &= P_{ss}\, J_- + P_{s.} F \end{aligned}\right\} \quad \text{pour chaque cellule}$$

$J_- = A J_+$ pour l'ensemble des cellules

où

ϕ, J_- et J_+ sont les matrices de flux moyen, courant entrant et courant sortant respectivement. $P_{s.}$ et P_{ss} sont les matrices de probabilités de collision de fuite et de transmission de la cellule.
F est la matrice de la densité d'émission.
A est la matrice géométrique. Elle représente le couplage de l'ensemble de la multicellule.

En éliminant successivement les courants dans le système d'équations ci-dessus on obtient une matrice approchée de probabilités de collision pour l'ensemble de la multicellule.

$$\phi = \tilde{P}\, F$$

avec $\tilde{P} = P + P_{.s} - P_{ss}\, P_{s.}$

et $P_{ss} = X\, A$

$x = (1 - A\, P_{ss})^{-1}$

Alors on obtient, les cellules A et B contenant respectivement les zones i et j, la probabilité de collision

$$P_{iA,jB} = \delta_{AB}\, P_{ij}^{+} + P_{is}^{A}\, P_{sA \to sB}\, P_{sj}^{B}$$

où $P_{sA \to sB}$ est la probabilité pour un neutron sortant de la cellule A d'atteindre la cellule B.

$$\delta_{AB} = \begin{cases} 0 \text{ si } A \neq B \\ 1 \text{ si } A = B \end{cases}$$

Cette équation est la base de toutes les approximations du type multicellule.

2.3 Codes d'équivalence

Les codes d'équivalence ont pour but de préserver les taux de réaction intégrés sur des zones (compositions) et sur chaque macrogroupe. Le bilan neutronique par zone sera ainsi le même en calcul de diffusion et en calcul de transport. On dispose actuellement de deux outils fondés sur le même principe.
L'un extérieur au code de transport utilisé en interface : Equipage, qui fournit les paramètres équivalents pour le calcul de diffusion aux différences finies.
L'autre inséré depuis peu dans le code Apollo ; DIFF 0 et DIFF 1 qui fournissent les paramètres équivalents pour des calculs de diffusion aux différences finies ou éléments finis.

Lors de l'interprétation d'expériences critiques destinées à tester un schéma de calcul, il importera de garder à l'esprit l'ensemble des hypothèses simplificatrices contenues dans le formalisme.

L'influence des diverses approximations sur le résultat (efficacité d'absorbants, distribution de puissance, etc ...) peut en effet être différente suivant qu'on les utilise dans un calcul de projet sur un coeur de grande dimension, ou dans l'interprétation d'une expérience critique de petite taille. L'analyse des résultats devra donc tenter de séparer les différents effets et leur ordre de grandeur pour que les conclusions puissent être transposées à l'ensemble des situations succeptibles d'être rencontrées.

CHAPITRE II

INTERPRETATION D'EXPERIENCES RELATIVES A DES POISONS CONSOMMABLES GADOLINIES

INTRODUCTION

Dans un coeur de réacteur nucléaire l'usure des noyaux lourds et l'empoisonnement par les produits de fission entrainent une baisse de réactivité au cours du temps. Pour obtenir un fonctionnement de longue durée d'un réacteur il faudra donc avoir en début de vie une réactivité potentielle très positive.

L'excédent initial de réactivité doit être compensé pour assurer le maintien à l'état critique du coeur durant le fonctionnement.

Un des moyens utilisés pour cela est l'emploi de poisons consommables. Jusqu'à présent on utilisait souvent des poisons consommables sous forme de borosilicate. Mais si l'on veut compenser un excédent important de réactivité on est obligé d'utiliser un grand nombre de poisons. D'autre part l'utilisation du borosilicate ne permet pas de diminuer suffisamment les moyens de contrôle pour maintenir un facteur de multiplication effectif constant.

Ceci a conduit à envisager, pour tous les types de réseaux dans les réacteurs à eau, l'utilisation du gadolinium comme poison consommable puisqu'il présente une section efficace d'absorption très élevée dans le domaine thermique et par conséquent une usure relativement rapide. Ce qui permet de disposer un nombre de crayons empoisonnés moins grand. D'autre part le gadolinium est d'un emploi plus souple : on peut notamment le mélanger aussi bien avec de l'alumine qu'avec de l'oxyde d'uranium et à des charges élevées. Toutes les spécifités du gadolinium laissent espérer que l'on puisse obtenir le maintien de l'état critique du réacteur en minimisant les problèmes de contrôle. Dans le but de qualifier valablement le calcul de ce poison nous avons interprété des expériences ayant eu lieu à AZUR (Cadarache) avec des configurations particulièrement propres où l'absorbant à base de gadolinium se trouve dans des situations différentes pour que nos conclusions soient suffisamment générales pour les calculs en début de vie.

Les deux types de situation traités sont les suivants :
. réseaux à barreaux comportant des crayons d'oxyde mixte d'uranium et de gadolinium (UO_2 - Gd_2O_3)
. réseaux à plaques parallèles avec des lattes d'alumine gadoliniée (Al_2O_3 - Gd_2O_3).

Ces essais avaient déjà été interprétés avec les modules du schéma Neptune en 1976 et 1979. Compte tenu des améliorations ayant été apportées depuis sur les données nucléaires et les modèles de calcul, nous avons repris ces études en essayant de séparer les effets liés aux données fondammentales et aux hypotèses de calcul.

QUELQUES PROPRIETES PHYSIQUES

Le Gadolinium est une terre rare, dont l'élément naturel contient plusieurs isotopes. La plupart de ces isotopes sont peu absorbants pour les neutrons. Seuls les deux isotopes ^{155}Gd et ^{157}Gd sont fortement absorbants dans le domaine thermique.

Les produits de la capture de ces deux isotopes, c'est-à-dire ^{156}Gd et ^{158}Gd ne sont pratiquement pas absorbants. Comme poison consommable le gadolinium peut être utilisé sous la forme d'oxyde Gd_2O_3 mélangé soit à l'oxyde d'uranium, soit à l'alumine.

Dans les tableaux qui suivent nous donnons pour les différents isotopes du Gadolinium les valeurs (recommandations BNL) des sections efficaces et l'intégrale de résonance, ainsi que les paramètres des résonances dans le domaine thermique (E < 0,625 eV).

Isotope	Pourcentage isotopique	σ_c (barns)	I_R (barns)
Elément naturel	100	49000 ± 1000	390 ± 10
152	0,2	1100 ± 100	3000 ± 300
154	2,15	85 ± 12	215 ± 20
155	14,73	61000 ± 500	1550 ± 50
156	20,47	1,5 ± 1,2	95 ± 5
157	15,68	254000 ± 2000	730 ± 20
158	24,87	2,5 ± 0,5	61 ± 6
160	21,90	0,77 ± 0,02	7,0 ± 1,0

σ_c : section efficace de capture radiative à 2200m/sec
I_R : Intégrale de résonance pour une énergie de coupure de 0,5 ev

Isotope	E_σ (eV)	Γ (meV)	29 Γ_n (meV)	J	Γ_γ (meV)	29 $\Gamma_n°$(meV)
155	0,8268 ± 0,0002	108 ± 1	0,130 ± 0,002	2	108 ± 1	0,794 ± 0,012
157	0,0314 ± 0,002	-	0,59 ± 0,01	-	106 ± 1	3,33 ± 0,06

A - INTERPRETATION DES EXPERIENCES "AZUR - CARAMEL" RELATIVES AUX LATTES D'ALUMINE GADOLINIEES

Une série d'expériences, concernant des configurations avec des absorbants sous forme d'alumine gadoliniée a eu lieu dans la pile Azur [5] en 1979. Ces expériences ont fait l'objet d'une première interprétation avec un schéma de calcul de projet [6].

L'objet de notre travail est l'interprétation des essais avec un nouveau schéma de calcul. Dans ce but, une première partie concerne des tests sur les différentes options de calcul et la procédure retenue comme étant la plus adaptée est ensuite utilisée pour l'interprétation proprement dite.

I PRESENTATION DES ESSAIS

1.1 Description du coeur et objectifs

Le coeur est composé de 35 rangées de 5 plaques placées bord à bord [5] (voir photo et figure N° 1). La tenue des plaques est assurée en bas grâce à 5 crémaillères en AG3. Au sommet les plaques sont maintenues par des lattes en AG3 échancrées pour laisser passer l'eau le long des plaques sur lesquelles elles s'appuient (figure N° 2). Le tout est maintenu par des barrettes de verrouillage. Une lame d'eau d'épaisseur moyenne 0,882 cm est ainsi créée entre chaque rangée de plaques. Pour ne pas diminuer le caractère "propre" de ce réseau (au sens neutronique du terme), aucune grille ne maintient l'écartement des plaques entre le haut et le bas du coeur, ce qui présente l'inconvénient de ne pas assurer un pas entre plaques rigoureusement uniforme.

Le contrôle et la sécurité sont assurés par 4 grappes de 6 plaques absorbantes en cadmium pouvant chuter entre les plaques.

Le programme expérimental a comporté essentiellement l'étude de configurations avec lattes d'alumine gadoliniée. Ces configurations sont réalisées en remplaçant des plaques combustibles du coeur de référence par un certain nombre de lattes, la teneur en gadolinium de celle-ci pouvant varier. L'étude du couplage lames d'eau - lattes d'alumine gadoliniée a aussi été effectuée.

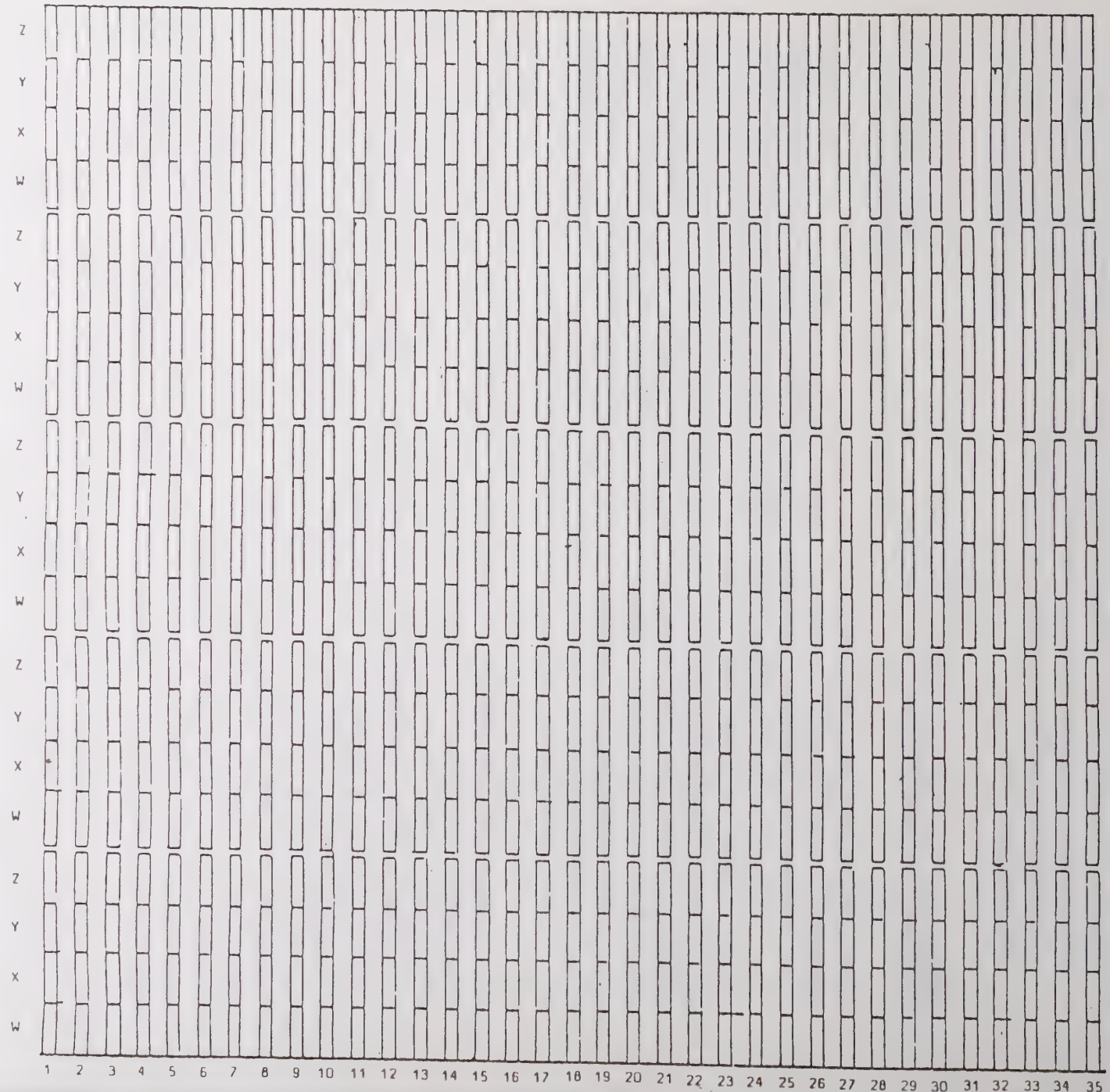
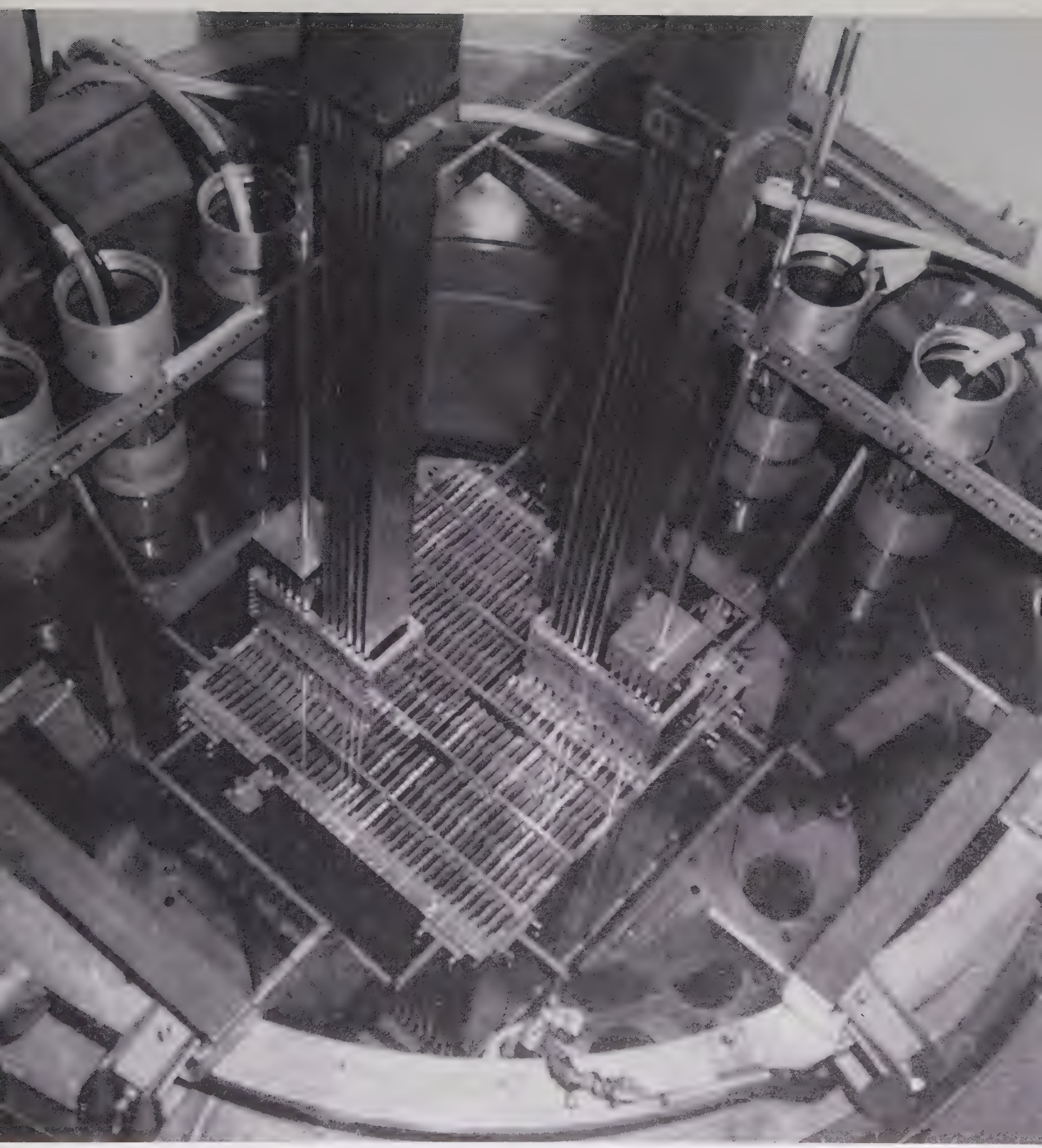
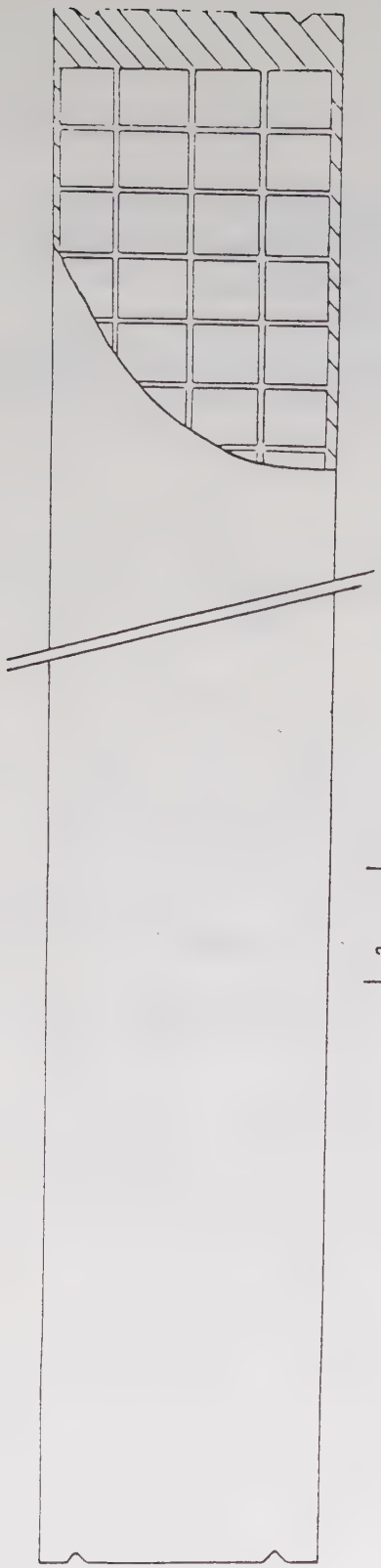


FIGURE N°1

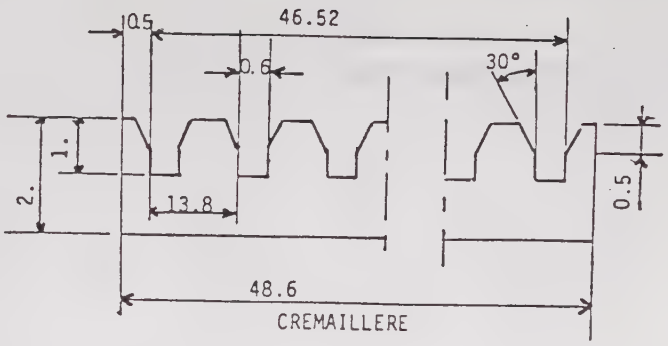
Géométrie du coeur de référence



COEUR CARAMEL



Géométrie plaque caramel



Géométrie structure

FIGURE N° 2

1.2 Géométrie des plaques

Chaque plaque combustible contient 4 rangées de 26 caramels (2,173 x 2,173 x 0,4 cm). Ces caramels sont séparés par des intercalaires de zirconium. L'épaisseur de ces intercalaires est de 0,05 cm sur la largeur et 0,1 cm verticalement.

Les plaques ont une longueur de 64 cm, une largeur de 9,2 cm et une épaisseur totale de 0,502 cm. La longueur de la partie active est de 59 cm, la largeur active étant de 8,84cm.

L'épaisseur des gaines est de 0,051 cm.

La géométrie des plaques d'alumine gadolinié est identique, mis à part le nombre et les dimensions des caramels : 4 rangées de 28 caramels de dimensions 2,1 x 2,1 x 0,4 cm. (voir figure N° 2).

1.3 Bilan matière

Dans le tableau ci-dessous sont rassemblées les valeurs moyennes obtenues pour 175 plaques combustibles (en grammes).

	1 plaque	1 caramel	175 plaques
zircaloy	667.78	6.42	116861.50
Uo_2	2007.88	19.31	351379.00
U total	1769.87	17.02	309727.25
U^5	90.17	0.87	15779.75
U^8	1697.70	16.15	293947.50
Poids total	2675.66	25.73	468240.50

L'enrichissement moyen (sur 110 plaques) en uranium 235 est de 5,0947 %.

Nous avons étudié des configurations avec des plaques d'alumine gadoliniées ayant différentes teneurs nominales d'oxyde de gadolinium dans le mélange (voir tableau ci-après).

Teneur nominale en mg/cm^3	Valeur pour le calcul en mg/cm^3	Poids moyen avant chromage des 112 caramels (en g)	Teneur en Gd_2O_3 dans 100 g de caramels (en g)	Poids de Gd_2O_3 dans les 112 caramels (en g)
700	670	830	15,88 $\pm$ 0,08	131,80
400	370	794	9,17 $\pm$ 0,06	72,80
200	180	775	4,61 $\pm$ 0,06	35,73

1.4 Configurations étudiées

Nous n'avons pas étudié toutes les configurations expérimentales car l'interprétation précédente [6] montrant que nous obtenions les mêmes tendances quels que soient les chargements, nous nous sommes limités à 2 configurations les plus proches possibles d'une situation à une dimension.

Chargement	Titre critique	Caractéristiques du coeur
383.01	685	Lame d'eau dans la rangée 19 Rangée 18 avec lattes d'alumine gadoliniée à 180, 360, 670, 370, 180 mg/cm^3
383.02	816	Coeur de référence avec lattes d'alumine gadoliniée dans la rangée 18 à 180, 370, 670, 370, 180 mg/cm^3

Ne disposant pas d'un nombre suffisant de plaques de même charge pour constituer une rangée, on a juxtaposé dans la rangée centrale (N° 18) des plaques (respectivement A, B, C, D, E) de charge différentes (respectivement 180, 360, 670, 360, 180 mg/cm^3).

1.5 Mesures effectuées

Les essais interprétés sont faits à 20°C et seules des mesures radiales dans le plan médian ont été effectuées.

1.5.1 Les différentes mesures

Pour les deux configurations il a été mesuré :

. Le titre critique en bore soluble par dosage chimique.

. Des distributions de puissance sur les caramels de certaines plaques par comparaison de leur activité γ après irradiation.

1.5.2 Les incertitudes expérimentales

Les configurations sont étudiées en relatif par rapport à la configuration de référence, la précision sur le titre en bore sera de l'ordre de quelques ppm (voir annexe A). Les mesures de répartition de puissance sont connues à $\pm$ 2 %.

II METHODE DE CALCUL

2.1 Schéma utilisé

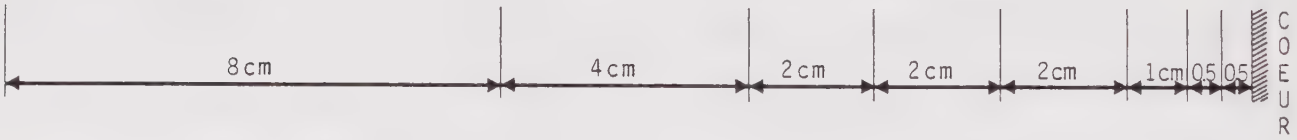
L'interprétation des résultats expérimentaux a été effectuée à l'aide des modules Apollo [3] et DIANE [1] du système de codes NEPTUNE [1] développé au CEA pour le calcul des réacteurs à eau. L'équivalence entre le calcul transport (Apollo) et le calcul diffusion (DIANE) est assurée à l'aide du code EQUIPAGE [4].

Le réseau de cellules élémentaires à une dimension est traité en théorie du transport à 99 groupes. A partir de ce calcul de référence, le calcul d'équivalence nous permet d'obtenir les paramètres neutroniques condensés à 4 macrogroupes d'énergie et homogénéisés que l'on utilise dans la partie coeur pour les calculs de diffusion.

Les sections efficaces microscopiques du réflecteur sont tirées d'un calcul plan d'interface coeur-réflecteur effectué par Apollo. Seuls les coefficients de diffusion proviennent d'un calcul de réflecteur infini. Ces sections efficaces sont conservées quel que soit le titre en bore, nous ne modifions que les concentrations de l'eau et du bore dans chaque cas.

Pour les calculs à deux dimensions, les fuites axiales sont simulées par l'utilisation d'un Laplacien axial B^2_z fonction du titre en bore [7].

Lors du calcul de diffusion, pour le coeur, le maillage spatial est le suivant :
. une maille par cellule dans le coeur,
. un maillage variable décrit ci-dessous pour le réflecteur,



Tout d'abord, nous devons traiter par APOLLO la situation à une dimension de la plaque de poison dans son environnement.

Pour cela nous devons savoir comment traiter :
. les intercalaires en zirconium des caramels gadoliniés,
. la zone combustible "tampon" située au voisinage de la cellule poison.

2.2 Traitement des intercalaires en zirconium de la plaque d'alumine gadoliniée

Il n'est pas possible lors du calcul de transport à une dimension de traiter la géométrie réelle des caramels de gadolinium et des intercalaires en zirconium. Nous devons considérer le milieu absorbant comme homogène. Nous avons alors la possibilité de tenir compte des intercalaires entre les caramels à deux étapes différentes des calculs.

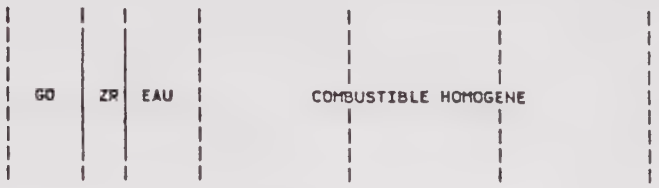
Directement au niveau du calcul transport, puis en effectuant le calcul diffusion avec les constantes équivalentes obtenues ; ou en effectuant le calcul transport sans tenir compte du zirconium et en faisant intervenir celui-ci uniquement au moment du calcul de diffusion en corrigeant les concentrations de gadolinium.

Nous avons donc mené deux séries de calculs, à savoir un calcul de transport une dimension sur une géométrie décrite ci-dessous comprenant une cellule gadolinium et trois cellules combustibles homogènes, suivi d'un calcul EQUIPAGE, puis d'un calcul DIANE toujours sur la même géométrie.

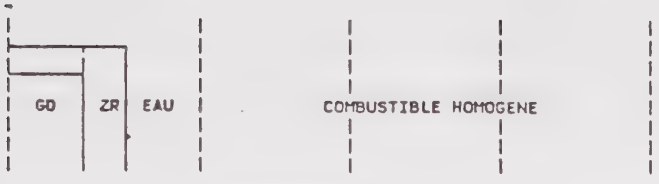
La première série de calculs est effectuée en tenant compte des intercalaires au niveau du calcul transport, en diluant le zirconium dans l'alumine gadoliniée. La deuxième série est effectuée en corrigeant les concentrations du gadolinium, au niveau du calcul diffusion, par un facteur

$$\alpha = \frac{\text{volume caramel}}{\text{volume plaque}}$$

Ces deux séries de calculs sont comparées à un calcul transport à deux dimensions qui tient compte des intercalaires zirconium explicitement (figure ci-dessous)



CALCUL APOLLO



CALCUL MARSYAS

Pour ce calcul nous utilisons le module MARSYAS. De manière globale, nous voyons avec les résultats regroupés dans le tableau qui suit, que lorsque nous tenons compte du zirconium intercalaire au niveau du calcul de diffusion nous avons un écart, par rapport au calcul MARSYAS, sur la valeur propre d'environ 150 pcm, alors que dans l'autre cas l'écart est d'environ 290 pcm.

	MARSYAS	APOLLO (sans Zr)	DIANE dilué	APOLLO (avec Zr)	DIANE (avec Zr)
K_{eff}	1,01948	1,01507		1,01685	
ΔK_{eff} (pcm)		- 433		- 258	
K_{inf}	1,09317	1,08834	1,09480	1,09008	1,09002
ΔK_{inf}		- 433	+ 149	- 283	- 288
q	0,71816	0,71782		0,71842	
Δq (pcm)		- 47		+ 36	
B^2	0,21616E-02	0,21616E-02		0,21616E-02	

α = 0,95455

Nous avons pû voir au niveau des calculs de transport, qu'il existe un écart sur les sections efficaces microscopiques, dans le macrogroupe thermique, des isotopes du gadolinium de l'ordre de 3 à 4 % entre le calcul MARSYAS et le calcul Apollo tenant compte des intercalaires ; alors que dans l'autre cas l'écart est pratiquement nul (tableau ci-dessous).

Gd	gr	MARSYAS	APOLLO (sans Zr)	APOLLO (avec Zr)
155	3	118,51	117,80	118,50
	4	818,09	817,93	847,42
156	3	13,05	13,01	13,02
	4	0,57	0,58	0,59
157	3	54,31	54,09	54,23
	4	3475,30	3473,70	3600,80
158	3	9,93	9,89	9,91
	4	0,25	0,26	0,26

Sections microscopiques des isotopes du gadolinium pour les macrogroupes 3 et 4.

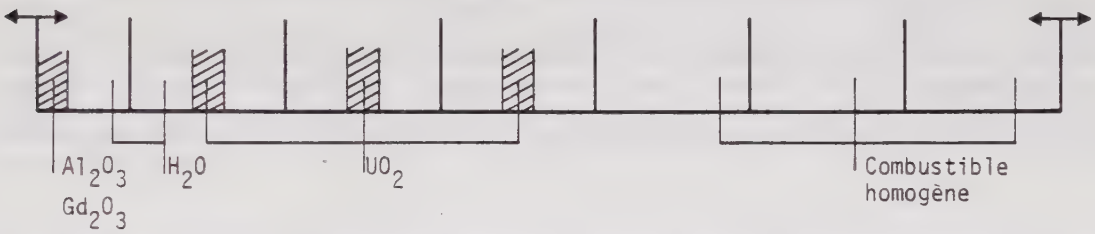
On constate que la prise en compte du zirconium au niveau du calcul Apollo augmente l'efficacité du gadolinium. La dilution du zirconium dans le gadolinium a pour effet de diminuer son autoprotection. On pourra s'en rendre compte en comparant les sections efficaces microscopiques dans le tableau ci-dessus, où l'on voit que sections efficaces du gadolinium dilué avec le zirconium sont plus grandes.

Toutes ces observations nous ont fait retenir, pour la suite de l'étude, la méthode qui consiste à faire intervenir les intercalaires en corrigeant les concentrations du gadolinium au niveau du calcul de diffusion.

2.3 Traitement de la zone combustible tampon

Nous devons pour le calcul de transport traiter l'absorbant dans son environnement. Le calcul transport se fera donc sur une géométrie comprenant la cellule d'absorbant et plusieurs cellules combustibles (nous appellerons zone combustible tampon l'ensemble de ces cellules combustibles).

La géométrie en transport lors de la première interprétation était la suivante :



Elle se composait de six cellules combustibles dont trois étaient décrites de manière hétérogène, les autres de manière homogène.

Nous avons fait plusieurs calculs pour déterminer qu'elle était la méthode la plus adéquate pour traiter la zone de combustible tampon. Les six cellules combustibles ont été traitées de différentes façons :

- 6 cellules hétérogènes - calcul 1
- 6 cellules homogènes - calcul 2
- 3 cellules hétérogènes + 3 cellules homogènes - calcul 3.

Pour des raisons de coût nous avons essayé de diminuer le nombre de points de calcul. Au niveau des cellules hétérogènes, la description explicite des gaines entraine un grand nombre de points pour une précision des calculs qui n'est pas en rapport avec le surcoût ainsi consenti. Les gaines ont donc été homogénéisées pour nos calculs. Nous avons deux possibilités, homogénéiser la gaine soit avec le combustible soit avec la lame d'eau. Pour déterminer la meilleure méthode les calculs suivants ont été effectués un calcul de cellule en milieu infini en traitant la géométrie exacte, un calcul avec la gaine homogénéisée avec l'eau et pour le dernier calcul la gaine est homogénéisée avec le combustible. Les résultats sont les suivants :

Calcul Apollo	Cellule hétérogène	Cellule gaine homogénéisé dans l'eau	Cellule gaine homogénéisé dans le combustible
keff	1,00040	0,99675	0,99961
$\partial k/k$(pcm)	-	- 366	- 79
kinf	1,37342	1,36886	1,37254
$\partial k_\infty/_{k_\infty}$(pcm)	-	335	65
q	0,55831	0,55879	0,55817
Δq (pcm)	-	+ 85	- 25
f	0,82494	0,82212	0,82643
$\frac{pth}{ptot} \frac{\partial f}{f}$(pcm)	-	- 282	+ 140
$(f-1) \frac{\partial \phi_e/\phi u}{\phi_e/\phi u}$	-	238	83

Nous voyons que les écarts sur le facteur de multiplication effectif (keff) sont d'environ 80 pcm pour le cas où la gaine est homogénéisée avec le combustible et de 370 pcm lorsque la gaine est homogénéisée avec l'eau. Les causes principales de ces écarts se situent dans le domaine thermique. En effet nous retrouvons sur f (absorption combustible/l'absorption totale) des écarts du même ordre de grandeur. On note que la plus importante cause des écarts est dûe au rapport du flux dans la lame d'eau au flux dans le combustible ($\phi e / \phi u$).

Ces résultats nous conduisent à préferer l'homogénéisation de la gaine dans le combustible, bien que des écarts soient enregistrés dans les deux cas. Ces écarts sont dûs au fait que lors d'une homogénéisation sur une partie seulement de la géométrie par le code APOLLO, les taux de réactions ne sont pas conservés dans chacune des zones de l'homogénéisation partielle cet handicap pourrait être levé si l'option SPH du code Apollo, méthode d'équivalence transport-transport, était disponible dans une géométrie plane.

Les cellules hétérogènes entrant dans les calculs 1 et 3 décrits ci-dessus ont donc été traitées avec la gaine homogénéisée avec le combustible.

Lorsque nous comparons les taux de réaction, par cellule, des calculs 2 et 3 avec le calcul 1 nous observons dans les deux cas des écarts de l'ordre de 3 à 4 % pour les cellules se situant à la frontière des zones hétérogènes et homogènes. Ces écarts se

retrouvent ensuite sur la distribution de puissance lors du calcul du coeur, ce qui ne permet pas de restituer correctement la distribution de puissance expérimentale.

D'autre part nous constatons que dans les calculs 2 et 3 la sixième cellule combustible n'est pas assymptotique du point de vue du spectre et du gradient de flux, en regard d'une cellule combustible en milieu infini. Ce qui lors du calcul d'équivalence transport diffusion nous conduit à ajuster les sections macroscopiques de la cellule absorbante par rapport à une cellule qui n'est pas asymptotique, entrainant ainsi des écarts en réactivité au niveau du calcul du coeur.

Compte tenu de toutes ces observations, dans la suite de l'étude, les cellules combustibles de la zone tampon seront traitées de manière hétérogène.

2.4 Bibliothèque utilisée

Depuis peu des améliorations ont été apportées à la bibliothèque de données de base en ce qui concerne les isotopes du Gadolinium et de l'uranium 238.

Les calculs ont été effectués avec la nouvelle bibliothèque, c'est-à-dire ; les isotopes pairs et impairs (autoprotégés) du gadolinium (numéro Apollib 2171, 2173 et 100155, 200157) ; le nouvel isotope d'uranium 238 (numéro Apollib 100238 associé à l'isotope effectif N° 2238).

Nous avons effectué un calcul de coeur avec le même schéma de calcul mais avec l'ancienne bibliothèque et uniquement les isotopes impairs (numéro apollib 100155 et 100157). L'écart enregistré sur la valeur propre est de l'ordre d'une dizaine de pcm.

2.5 Normalisation des résultats de distribution de puissance

Les résultats sont normalisés de telle sorte que les sommes des valeurs expérimentales et calculées soient égales.

III CONFIGURATION DE REFERENCE

L'étude de cette configuration a été faite de manière séparée [7]. Nous rappelons ici les principaux résultats.

3.1 Calculs effectués

Nous devons effectuer un calcul transport sur la géométrie de la cellule élémentaire pour obtenir les paramètres neutroniques à introduire dans le calcul de diffusion.

Pour le traitement de cette cellule se pose le problème de la discrétisation de la variable espace. La résolution spatiale est faite par Apollo à l'aide de probabilités

de première collision en découpant l'espace en zones de flux plat. La précision des calculs dépend donc de la finesse du découpage spatial.

En général on n'utilise qu'une zone par milieu. Le réseau que nous traitons ici est un peu particulier car les lames d'eau entre plaques sont très larges (8,82 mm). Dans ces lames d'eau le libre parcours est de l'ordre de 0,5 cm dans le domaine thermique. La demi lame d'eau représentée dans le calcul est donc de l'ordre du libre parcours moyen thermique. Dans ces conditions une seule zone de flux plat ne parait pas suffisante. Ceci a été confirmé par une étude [7] qui montre que quatres zones sont nécessaires pour obtenir une précision suffisante sur le facteur d'utilisation thermique de la cellule.

Dans le combustible par contre, une seule zone est suffisante.

3.2 Résultats

3.2.1 Les effets en réactivité

Pour un titre de 1249 ppm de bore la valeur propre obtenue à l'issue du calcul de diffusion est 1,00594.

Le léger écart de 90 pcm par rapport à la valeur annoncée dans [7] est dû à l'utilisation de l'isotope 100238 (autoprotection avec Breit et Wigner multiniveaux).

Deux calculs à $\pm$ 100 ppm du titre en bore critique nous permettent de calculer l'efficacité du bore soluble.

La valeur calculée - 12,5 pcm/ppm rejoint la valeur expérimentale - 12,7 pcm/ppm.

3.2.2 Les distributions de puissance

Les distributions de puissance calculées et mesurées et les écarts $\frac{\text{Expérience - calcul}}{\text{calcul}}$ sont portés sur les tableaux qui suivent :

PLAQUE	A				B				C	
RANGEE	W	X	Y	Z	W	X	Y	Z	W	X
18	0.56	0.58	0.69	0.80	0.92	1.01	1.08	1.14	1.18	1.20
19										
20									1.17	1.19
21										
22									1.13	1.14
23										
24	0.51	0.53	0.62	0.73					1.07	1.08
25										
26									0.98	0.99
27										
28	0.42	0.43	0.51	0.60	0.67	0.74	0.80	0.84	0.87	0.89
29										
30									0.74	0.76
31										
32	0.29	0.31	0.36	0.42	0.47	0.52	0.56	0.59	0.61	0.62
33									0.55	0.56
34									0.51	0.52
35	0.24	0.27	0.33	0.37	0.42	0.47	0.51	0.53	0.55	0.55

DISTRIBUTION DE PUISSANCE CALCULEE (REFERENCE)

PLAQUE	A				B				C	
RANGEE	W	X	Y	Z	W	X	Y	Z	W	X
18	+.02	-.04	-.01	+.02	+.01	-.01	-.03	+.02	+.04	0.00
19										
20									+.01	-.02
21										
22									+.03	+.03
23										
24	-.02	-.02	-.02	+.01					-.01	-.01
25										
26									+.02	0.00
27										
28	+.02	+.05	+.06	+.05	+.06	0.00	-.01	+.02	+.02	0.00
29										
30									+.03	+.01
31										
32	+.03	0.00	0.00	+.02	+.02	0.00	0.00	+.02	+.02	0.00
33									0.00	-.02
34									-.02	-.04
35	+.04	0.00	-.03	+.03	+.02	-.02	-.02	-.02	-.04	-.04

E-C/C (REFERENCE)

3.2.3 Variation de la taille du coeur

La configuration de référence qui a été étudiée jusqu'ici comportait 35 rangées de plaques. Afin d'évaluer l'incidence de la taille du coeur sur nos résultats, deux configurations supplémentaires ont été étudiées. Elles comportent respectivement 29 et 25 rangées de 5 plaques.

Les résultats expérimentaux sont les suivants

nombre de plaques	ppm de bore critique
35	1249
29	1031
25	834

Les résultats obtenus dans [7] sont :

nombre de plaques	valeur propre
35	1,00503
29	1,00448
25	1,00375

Il apparaît une dérive de la valeur propre en fonction de la taille du coeur. L'interprétation en est rendue compliquée par le cumul de diverses erreurs probables. On peut mettre en cause les hypothèses de calcul.
Nous savons en particulier que la méthode qui consiste à condenser les sections efficaces sur le spectre assymptotique du milieu combustible conduit à des erreurs dans la zone transitoire proche du réflecteur. Il est donc logique que suivant l'importance de cette zone transitoire (importance qui augmente lorsque la taille du coeur diminue), l'incidence de ces erreurs sur la valeur propre globale du coeur varie.

Pour illustrer cet effet il a été choisi d'analyser un paramètre global que l'on appellera "$k\infty$ local" et qui représente le taux de production rapporté à l'absorption pour une zone combustible donnée.

Dans le tableau suivant, on trouvera la valeur moyenne $k\infty$ de ce paramètre sur tout le coeur comparée à la valeur assymptotique que l'on trouve sur la maille située au centre du coeur.

Nombre de plaques	k∞ coeur	k∞ maille centrale	k∞ Apollo cellule	k∞/k∞ assymptotique
35	1.28574	1.27966	1.27968	1.00478
29	1.32139	1.31307	1.31314	1.00628
25	1.35601	1.34508	1.34512	1.00810

On peut constater que si le bilan neutronique dans la maille centrale correspond à celui du calcul de transport sur la cellule élémentaire en milieu infini, le k∞ moyen sur le coeur s'éloigne d'autant plus de cette valeur assymptotique que le coeur est petit.

IV CONFIGURATION AVEC LATTE D'ALUMINE GADOLINIEE

4.1 Les effets en réactivité

Nous établissons l'équivalence entre bore soluble et gadolinium afin d'analyser les calculs d'efficacité du poison. Nous nous interessons uniquement aux effets différentiels entre les divers chargements et la configuration de référence.

Pour établir l'équivalence entre bore soluble et gadolinium il faut connaître expérimentalement la valeur en réactivité du ppm de bore $(\frac{\partial \rho}{\partial T})_{exp}$ pour tous les titres envisagés. Une seule mesure de ce paramètre a été effectuée autour du titre 1249 ppm.

Nous supposons que calcul et expérience seraient en bon accord pour tous les chargements envisagés, ce qui permet d'écrire pour l'efficacité relative du poison au chargement "i".

$$\mathcal{E}^{i}_{exp} = \left[\int_{o}^{i} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{i} dT\right]_{exp} = \left[\int_{o}^{i} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{i} dT\right]_{cal} = \delta\rho$$

Les indices "o" et "i" sont relatifs au coeur de référence et au chargement "i".

L'étude précédente [6] a montré que l'on pouvait supposer linéaires les variations de $\frac{\partial \rho}{\partial T}_{calc}$ en fonction du titre. Ce qui permet d'écrire

$$\mathcal{E}^{i}_{exp} = \int_{o}^{i} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right) dT = \frac{1}{2} (T_o - T_i)_{exp} \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{o} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{i}\right]_{calcul}$$

L'efficacité calcul est donnée par :

$$\mathcal{E}^{i}_{calcul} = \mathcal{E}^{i}_{exp} + \delta\rho_{i}$$

où $\delta\rho_i = 10^5 \log \frac{\lambda i}{\lambda o}$ représente la dérive de la valeur propre critique pour le chargement "i" par rapport à la valeur propre du coeur de référence (λo et λi étant la valeur propre critique du coeur de référence et pour le chargement i).

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

Chargement	Titre en bore (ppm)	Valeur propre	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ (pcm)	$\frac{\partial\rho}{\partial T}$ $\frac{pcm}{ppm}$	Efficacité $\mathcal{E}_{exp}$ (pcm)	$\frac{\Delta\lambda/\lambda}{\mathcal{E}}$ (%)
1 rangée Gd	816	1,00612	+ 17	- 13,2	- 5564	- 0,4
1 rangée Gd + 1 lame d'eau	685	1,00570	- 23	- 14,4	- 7577	+ 0,3

Les écarts sur la valeur propre pour les deux chargements sont de 17 et 23 pcm ce qui, compte tenu de la précision des mesures et des calculs, peut être considéré comme non significatif.

4.2 Les distributions de puissance

Les distributions de puissance calculées et mesurées ainsi que les écarts Expérience-calcul sont portés sur les tableaux qui suivent :

PLAQUE	C			
	W	X	Y	Z
RANGEE				
9	0.94	0.96	0.96	0.94
10				
11	0.98	1.00	1.00	0.98
12				
13	0.99	1.01	1.01	0.99
14				
15	0.94	0.95	0.95	0.94
16	0.89	0.90	0.90	0.89
17	0.71	0.73	0.73	0.71
18	GADOLINIUM			
19	EAU			
20	1.23	1.25	1.25	1.23
21	1.02	1.04	1.04	1.02
22	0.99	1.00	1.00	0.99
23				
24	0.98	0.99	0.99	0.98
25				
26	0.96	0.97	0.97	0.96
27				
28	0.89	0.91	0.91	0.89

DISTRIBUTION DE PUISSANCE CALCULEE (383-01)

	C			
	W	X	Y	Z
9	+4.1	-1.1	-1.1	+2.0
10				
11	+5.8	+1.5	+1.5	+3.9
12				
13	+2.5	-2.0	-2.0	0.0
14				
15	+1.0	-2.2	-2.2	-1.0
16	0.0	-3.5	-3.4	0.0
17	+7.8	+1.4	+2.7	+7.8
18	GADOLINUIM			
19	EAU			
20	-6.0	-6.8	-6.8	-3.4
21	-1.0	-5.1	-6.1	+0.9
22	-1.0	-3.0	-1.0	+2.9
23				
24	+1.0	0.0	0.0	+3.9
25				
26	+4.0	+1.0	+2.0	+3.0
27				
28	0.0	0.0	-1.1	+3.3

E-C/C (0/0) (383-01)

PLAQUE	B				C			
	W	X	Y	Z	W	X	Y	Z
RANGEE								
18	GADOLINIUM							
19	0.69	0.75	0.80	0.84	0.85	0.86	0.86	0.85
20	0.78	0.85	0.91	0.95	0.98	0.99	0.99	0.98
21	0.80	0.88	0.94	0.99	1.02	1.04	1.04	1.02
22								
23	0.81	0.89	0.95	1.00	1.04	1.06	1.06	1.04
24								
25	0.79	0.87	0.93	0.98	1.02	1.03	1.03	1.02

DISTRIBUTION DE PUISSANCE CALCULEE (383-02)

PLAQUE	B				C			
	W	X	Y	Z	W	X	Y	Z
RANGEE								
18	GADOLINIUM							
19	-1.5	-5.6	-3.9	0.0	0.0	-2.4	-2.4	+2.3
20	+1.3	-1.2	-3.4	+1.0	-2.1	-7.6	-5.4	-3.2
21	+2.4	-3.5	-3.3	0.0	-1.5	-3.5	-2.9	0.0
22								
23	+6.9	+6.3	+5.9	+8.3	+4.6	+0.9	-0.9	+2.8
24								
25	+7.1	+1.1	+1.0	+2.9	0.0	-5.1	-3.5	-2.5

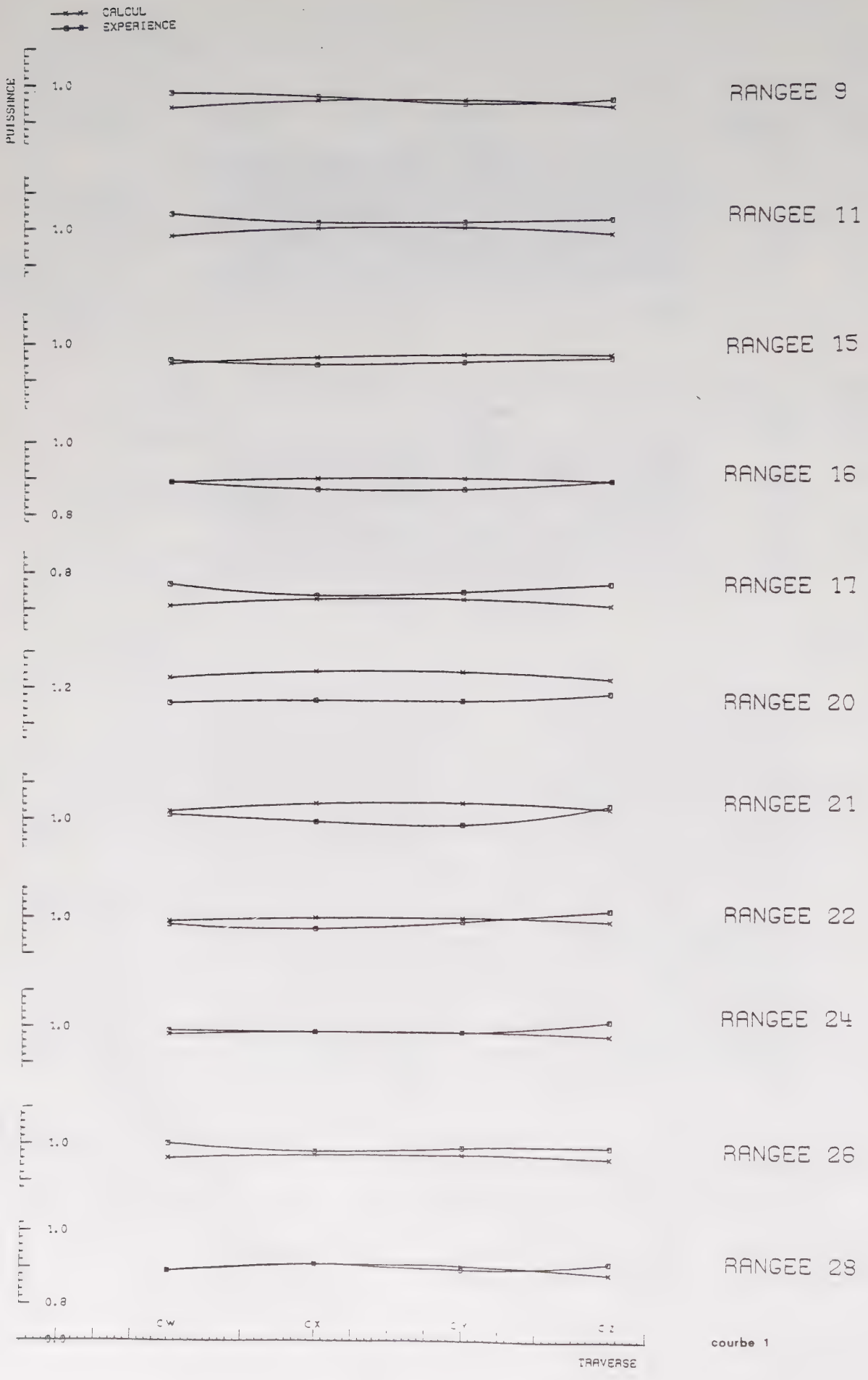
E-C/C (0/0) (383-02)

Nous avons un très bon accord calcul-expérience compte tenu des incertitudes sur les mesures (± 2 %). Certains points se trouvent néanmoins en dehors de la fourchette d'incertitude. Ceci est dû à des hétérogénéités que l'on ne peut pas prendre en compte par le calcul, il s'agit notamment :

. de l'effet de bords de plaques : lors du calcul, nous supposons que le coeur est une juxtaposition de caramels sur une rangée. Nous ne pouvons pas prendre en compte le zirconium du bord de plaque qui constitue la structure de la plaque.

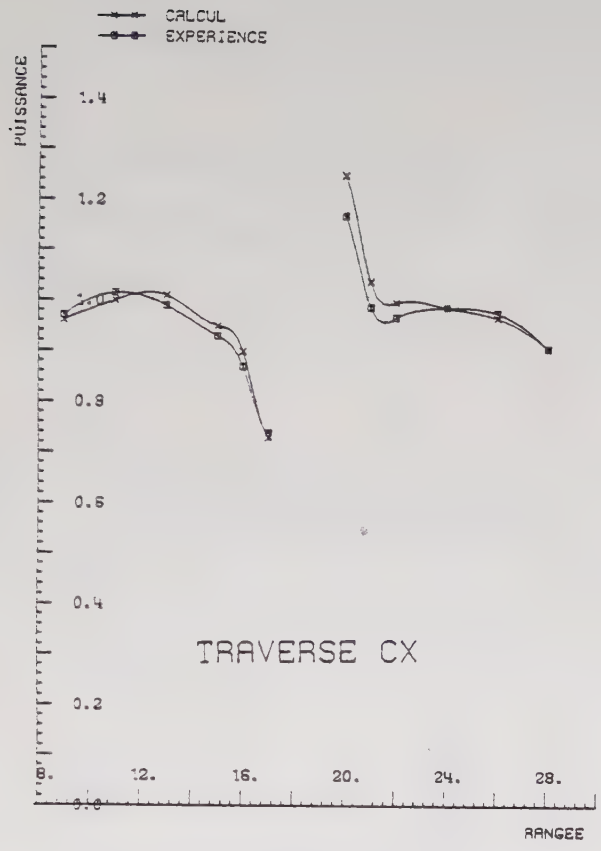
. de l'effet de sabre : l'absence de structures et de grilles de maintien dans un plan intermédiaire entre la crémaillère du bas et les lattes échancrées du haut dans le coeur peut entraîner certaines déformations des plaques (courbures), bien qu'un tri préalable ait eû lieu ; d'où une apparition de lame d'eau plus grande dans certaines zones ce qui peut expliquer des valeurs expérimentales singulières.

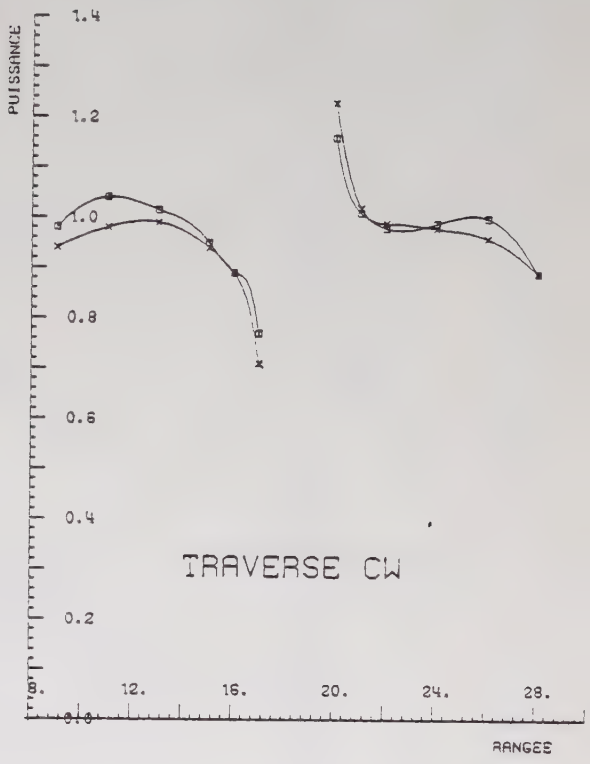
Ces deux effets sont très visibles sur les courbes qui suivent où l'on a représenté les distributions de puissance expérimentales et calculées pour plusieurs traverses et rangées du coeur. Les courbes expérimentales (voir courbe 1 et 6) présentent une concavité vers le haut (pour chaque plaque) qui met bien en évidence le premier effet.
Une certaine irrégularité dans la forme des courbes expérimentales (voir courbe 2, 3, 4, 5, 7) montre l'existence du deuxième effet.

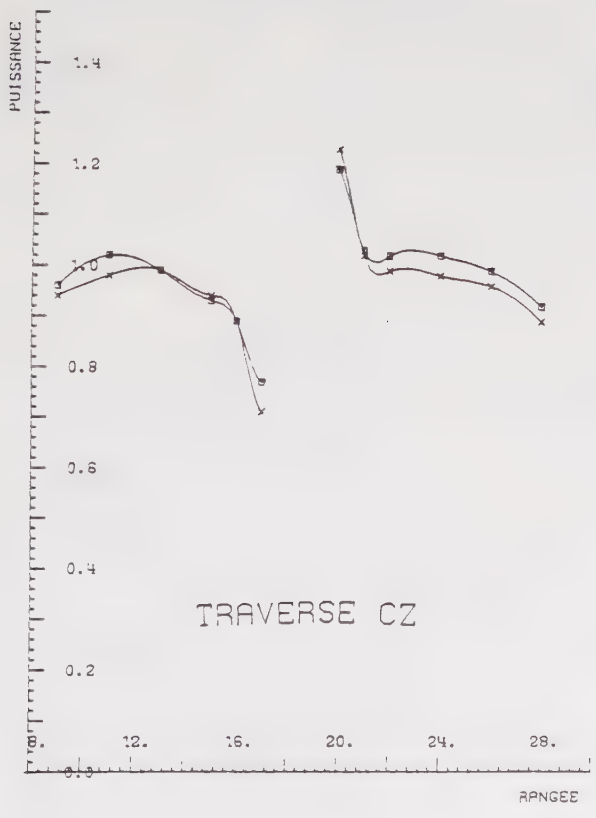

383-01 DISTRIBUTION DE PUISSANCE
CALCUL
EXPERIENCE
PUISSANCE
1.0
1.0
1.0
1.0
0.8
0.8
1.2
1.0
1.0
1.0
1.0
0.8
RANGEE 9
RANGEE 11
RANGEE 15
RANGEE 16
RANGEE 17
RANGEE 20
RANGEE 21
RANGEE 22
RANGEE 24
RANGEE 26
RANGEE 28
C W
C X
C Y
C Z
TRAVERSE

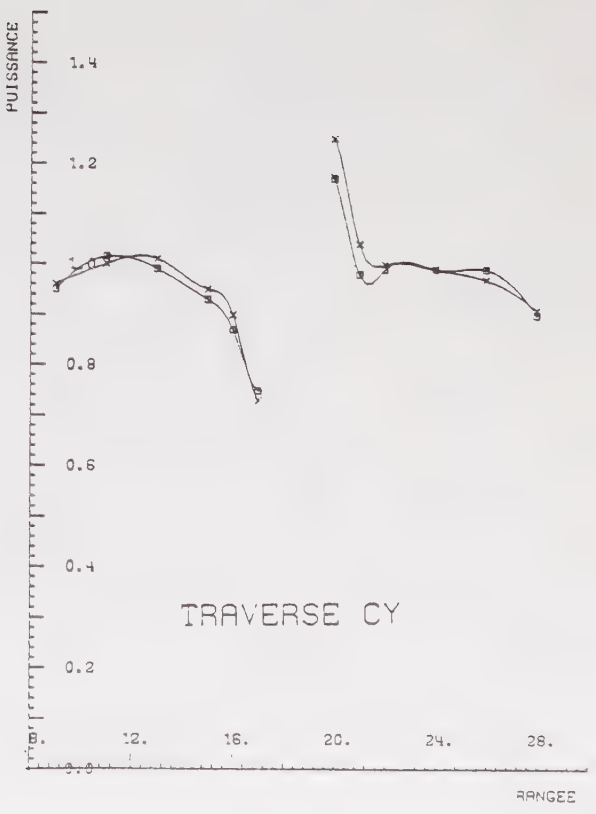
courbe 1

383-02 DISTRIBUTION DE PUISSANCE

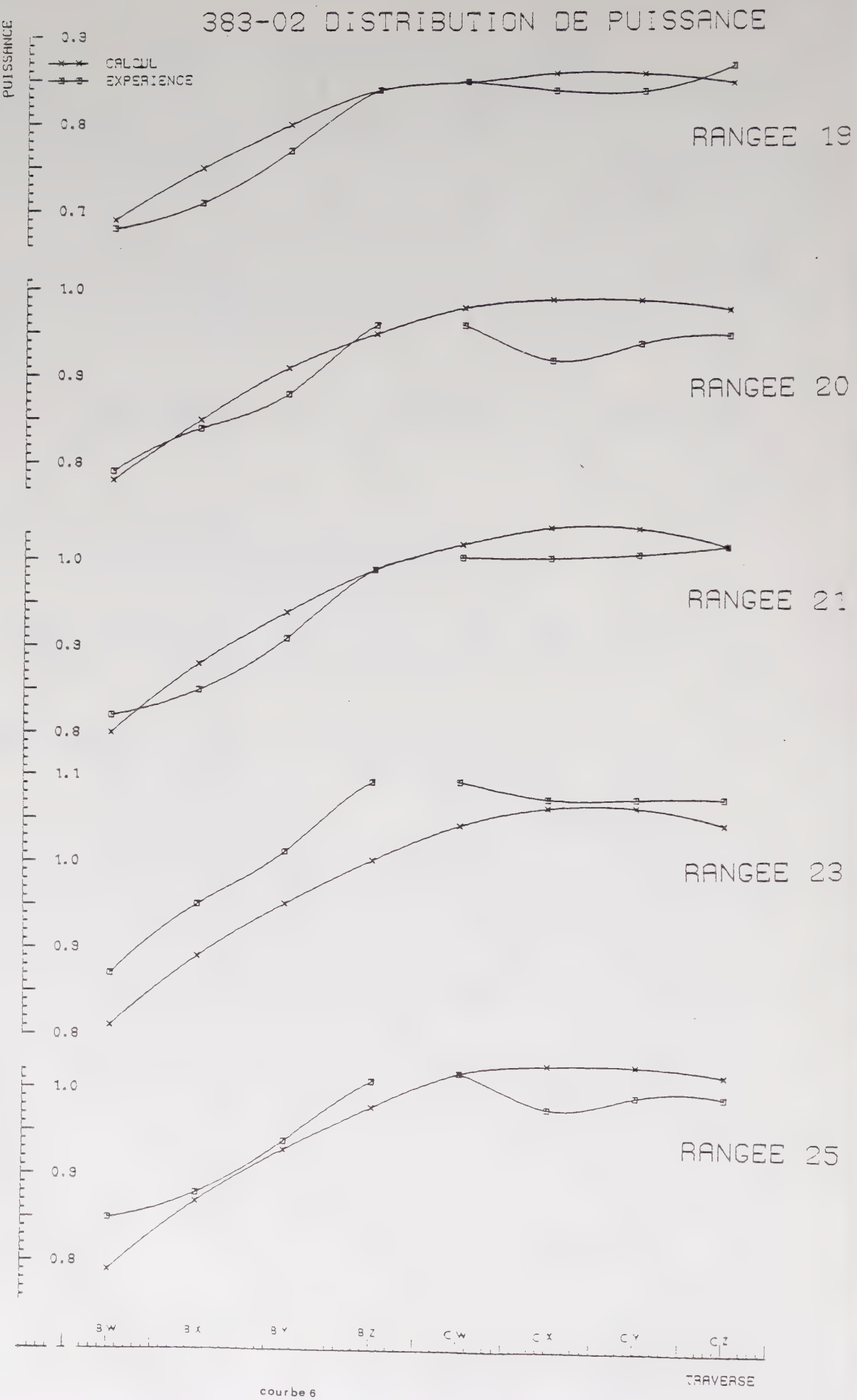




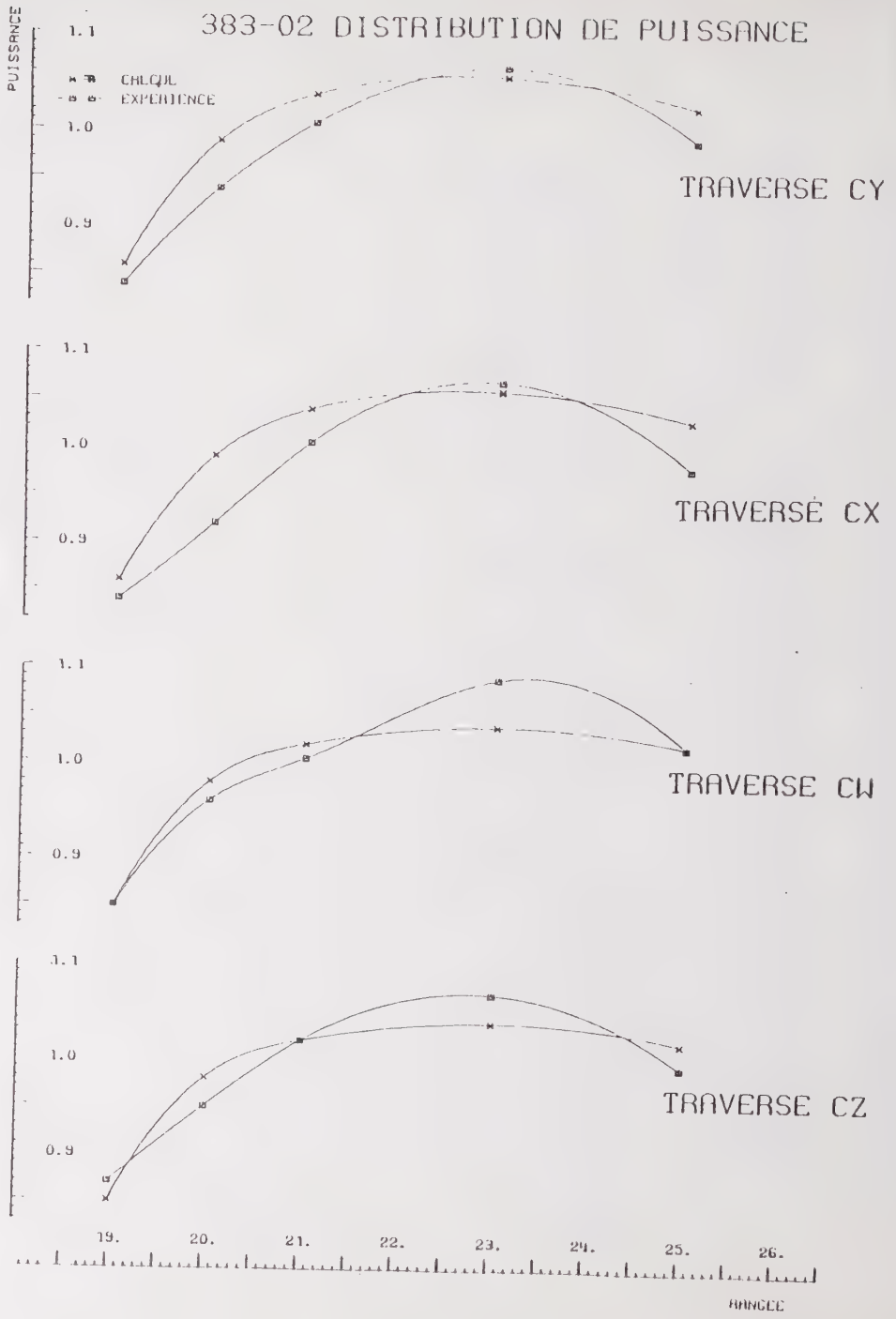


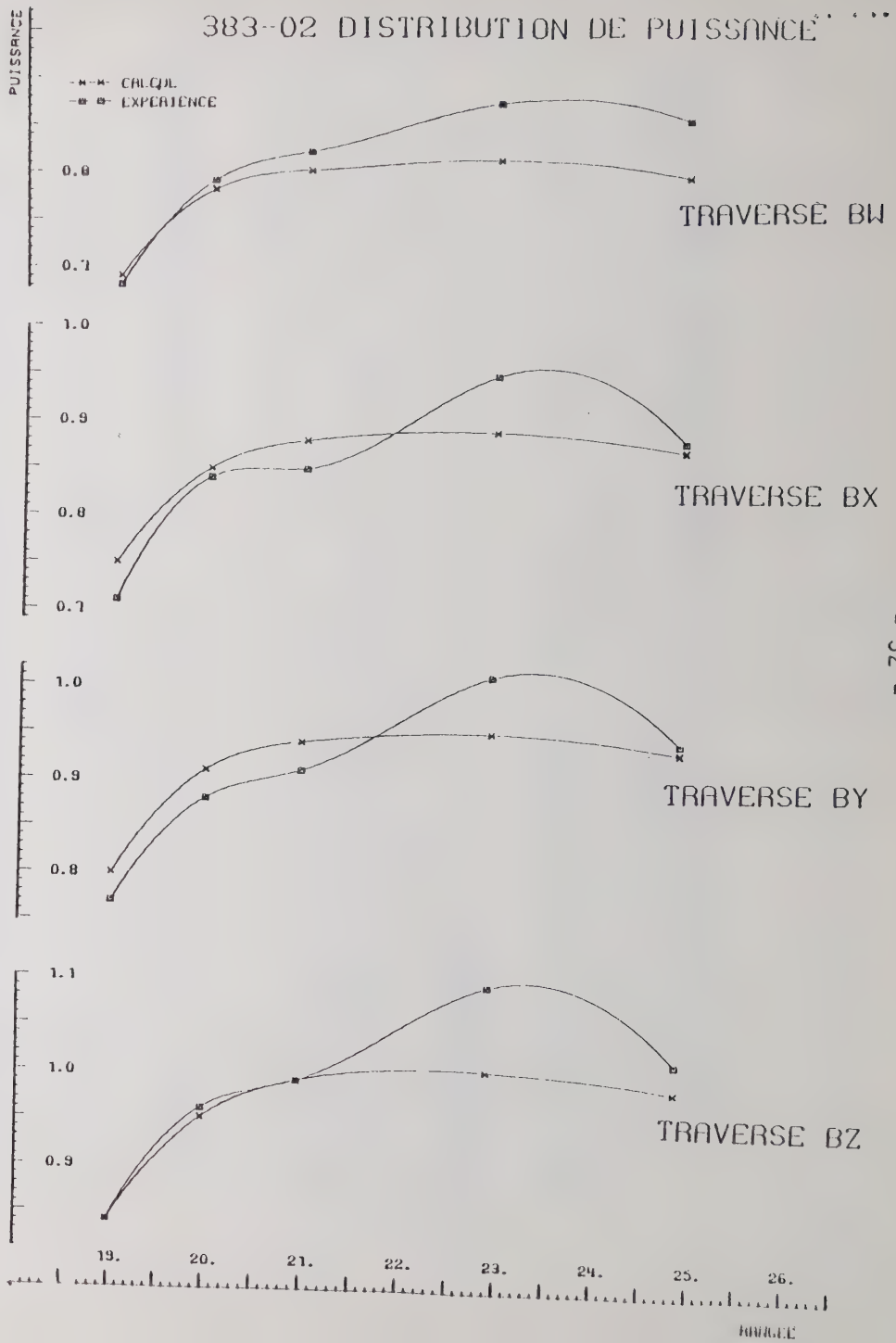


courbe 2 - 5


383-02 DISTRIBUTION DE PUISSANCE
PUISSANCE
CALCUL
EXPERIENCE
RANGEE 19
RANGEE 20
RANGEE 21
RANGEE 23
RANGEE 25
0.9
0.8
0.7
1.0
0.9
0.8
1.0
0.9
0.8
1.1
1.0
0.9
0.8
1.0
0.9
0.8
BW
BX
BY
BZ
CW
CX
CY
CZ
TRAVERSE

courbe 6


383-02 DISTRIBUTION DE PUISSANCE
PUISSANCE
CALCUL
EXPERIENCE
TRAVERSE CY
TRAVERSE CX
TRAVERSE CW
TRAVERSE CZ
1.1
1.0
0.9
19.
20.
21.
22.
23.
24.
25.
26.
RANGEE


383-02 DISTRIBUTION DE PUISSANCE
PUISSANCE
CALCUL
EXPERIENCE
TRAVERSE BW
TRAVERSE BX
TRAVERSE BY
TRAVERSE BZ
1.0
0.9
0.8
0.7
19.
20.
21.
22.
23.
24.
25.
26.
RANGEE

courbe 7

Des écarts un peu plus importants pour le chargement 383.01 dans la rangée juxtaposant la lame d'eau sont probablement dûs au fait que le gradient de flux y est imparfaitement calculé, le nombre de points de calculs dans la lame d'eau ayant été limité pour des raisons de coût.

V ANALYSE DES RESULTATS

L'Etude faite montre que pour un cas assimilable à une situation à une dimension, les effets dûs à la présence d'absorbant à base de gadolinium sont bien calculés ; autant en ce qui concerne l'efficacité globale que la distribution de puissance qui est bien restituée par le calcul compte tenu des remarques précédentes (les distributions calculées recoupent bien les distributions expérimentales malgré les points singuliers (voir courbes précédentes)).

Nous avons pû voir que les légers écarts obtenus lors de la première interprétation n'étaient pas dus à des problèmes de bibliothèque, mais au schéma de calcul, et qu'en utilisant un schéma plus fin (discrétisation spatiale, traitement de la zone combustible tampon) qu'un schéma de projet ces écarts disparaissaient.

L'introduction des isotopes pairs du gadolinium n'entraîne pas de modifications importantes sur les grandeurs mesurées, pour un coeur en début de vie.

On a remarqué, d'autre part, l'importance de la zone situé à l'interface coeur-réflecteur et son influence sur la valeur propre suivant les configurations.

B - INTERPRETATION DES EXPERIENCES "AZUR-CAP 1800" RELATIVES AUX CRAYONS D'UO_2 - Gd_2O_3

A partir d'Octobre 1975, un coeur représentant l'équivalent de quatre éléments à crayons oxyde UO_2, du type CAP 1800, a été étudié dans la pile Azur pendant plusieurs mois [8].

Une première interprétation en a été faite en vue de qualifier le schéma de calcul de projet du coeur,en ce qui concerne les problèmes liés aux hétérogénéités variées (poisons, trous d'eau) [8]. Nous avons repris ici l'interprétation des expériences avec poisons gadoliniés. Dans ce but nous avons mis en oeuvre et testé différentes options de calcul. Une part importante du travail a consisté en une étude comparative des différents modules "multicellule" du code Apollo.

I PRESENTATION DES ESSAIS

1.1 Description du coeur et objectifs

Le coeur est composé de quatre éléments 17 x 17 assemblés de façon que le pas entre crayons de 12,6 mm soit respecté au centre du réseau.

Dans chaque élément, les crayons sont posés sur une plaque de pied et tenus par cinq grilles d'aluminium.

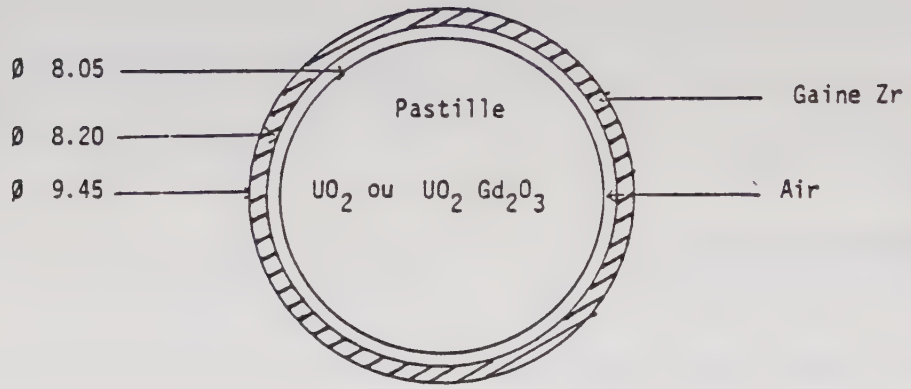
Une protection composée de plaques d'aluminium de un mm d'épaisseur entoure le coeur.

Lors de la campagne d'essai plusieurs configurations ont été envisagées avec différents types de poisons (crayons de Hafnium, de Pyrex, d'UO_2 - Gd_2O_3). Nous nous sommes limités dans ce chapitre à l'étude des configurations avec poisons gadoliniés. Les crayons empoisonnés auront toujours la même charge en gadolinium.

1.2 Composants du coeur

Nous avons représenté ci-dessous la coupe des crayons composant le réseau.

GEOMETRIE DES CRAYONS UTILISES



1.2.1 Crayons d'UO_2

Les crayons ont un diamètre de 8,2 mm et sont enrichis en uranium 235 à 6,2 %. Le diamètre des pastilles est de 8,05 mm et la hauteur de combustible est de 1800 mm. La masse moyenne d'oxyde par crayon est de 928 g ([8]). Les gaines des crayons sont en zircalloy et ont une épaisseur de 0,62 mm.

1.2.2 Crayons Gadolinium

Les crayons d'oxyde UO_2 - Gd_2O_3 ont les mêmes dimensions et sont entourés de la même gaine que les crayons UO_2. L'oxyde de Gadolinum représente 3 % en masse du mélange, et il est réparti de façon homogène dans l'UO_2 enrichi à 5,1 %. Il y a 927 g de mélange UO_2 - Gd_2O_3 par crayon.

1.2.3 Autres crayons absorbants

Ce sont des crayons de hafnium et de carbure de bore qui sont complètement retirés du coeur lors des mesures.

1.2.4 Trous d'eau

Dans chaque assemblage, 18 crayons combustibles ont été retirés pour permettre le passage des crayons d'absorbants de contrôle. Dans les trous d'eau ainsi constitué on a placé un tube creux de zircalloy, de diamètre extérieur 12 mm et de diamètre intérieur 11,20 mm, servant de guide aux crayons de contrôle.

1.3 Configurations étudiées

Comme nous l'avons vu nous n'avons pas étudié toutes les configurations expérimentales, car nous ne nous interessons ici qu'aux aspects poisons gadoliniés.

Les configurations suivantes ont été étudiées :

- La configuration, dite de référence, ne comportant que des crayons UO_2 sans aucune perturbation (chargement 340).
- La configuration avec quatre crayons gadolinium (chargement 341).
- La configuration avec seize crayons gadolinium (chargement 342).
  (voir figures ci-dessous).

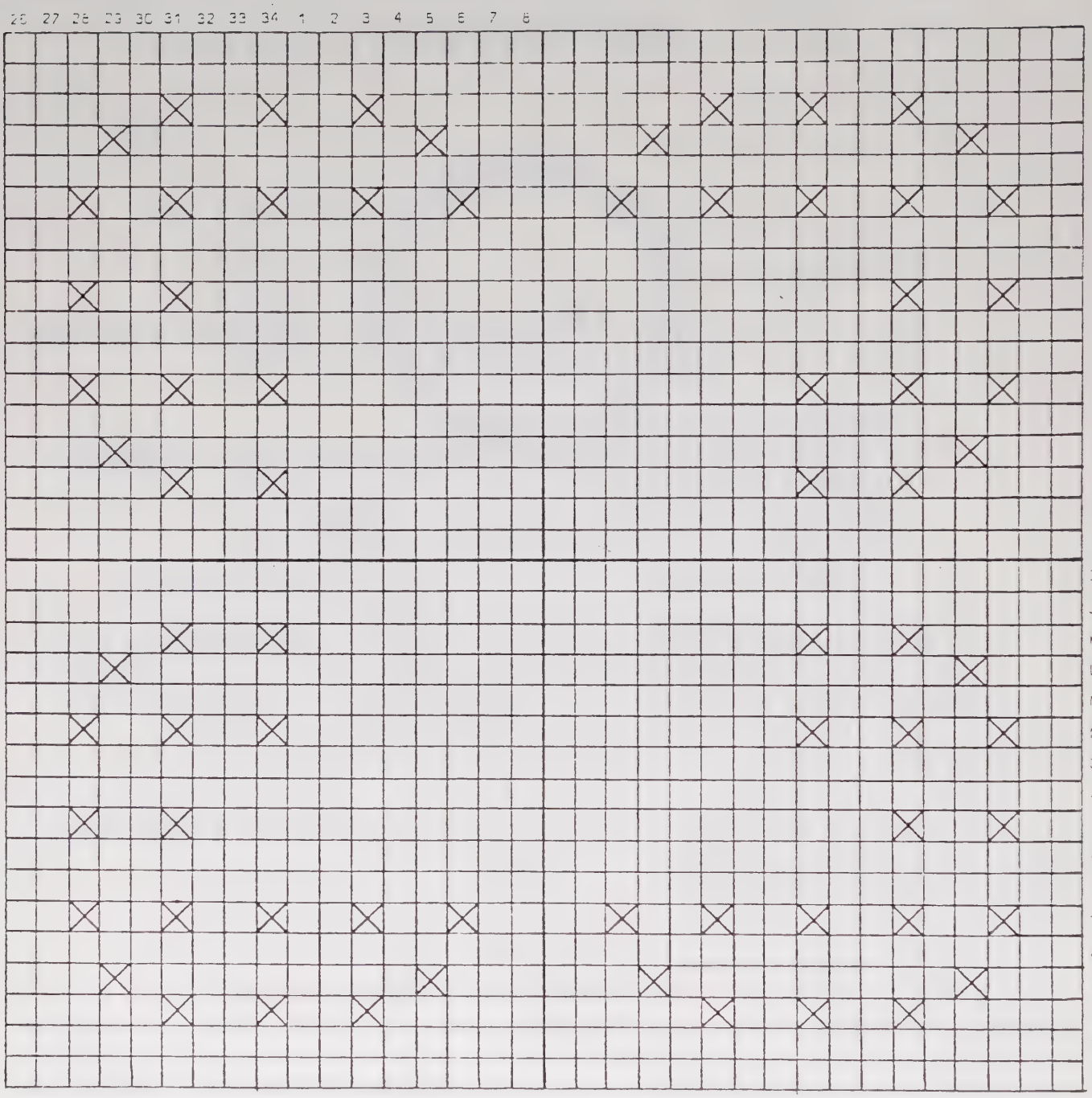
La zone périphérique, commune à toutes les configurations, comprend 18 trous d'eau (avec tube guide) par assemblage correspondant au passage des crayons absorbants de contrôle.

1.4 Mesures effectuées

Les essais interprétés sont faits à 20°C et seules des mesures radiales dans le plan médian ont été réalisées.

CONFIGURATION n° 340

Référence

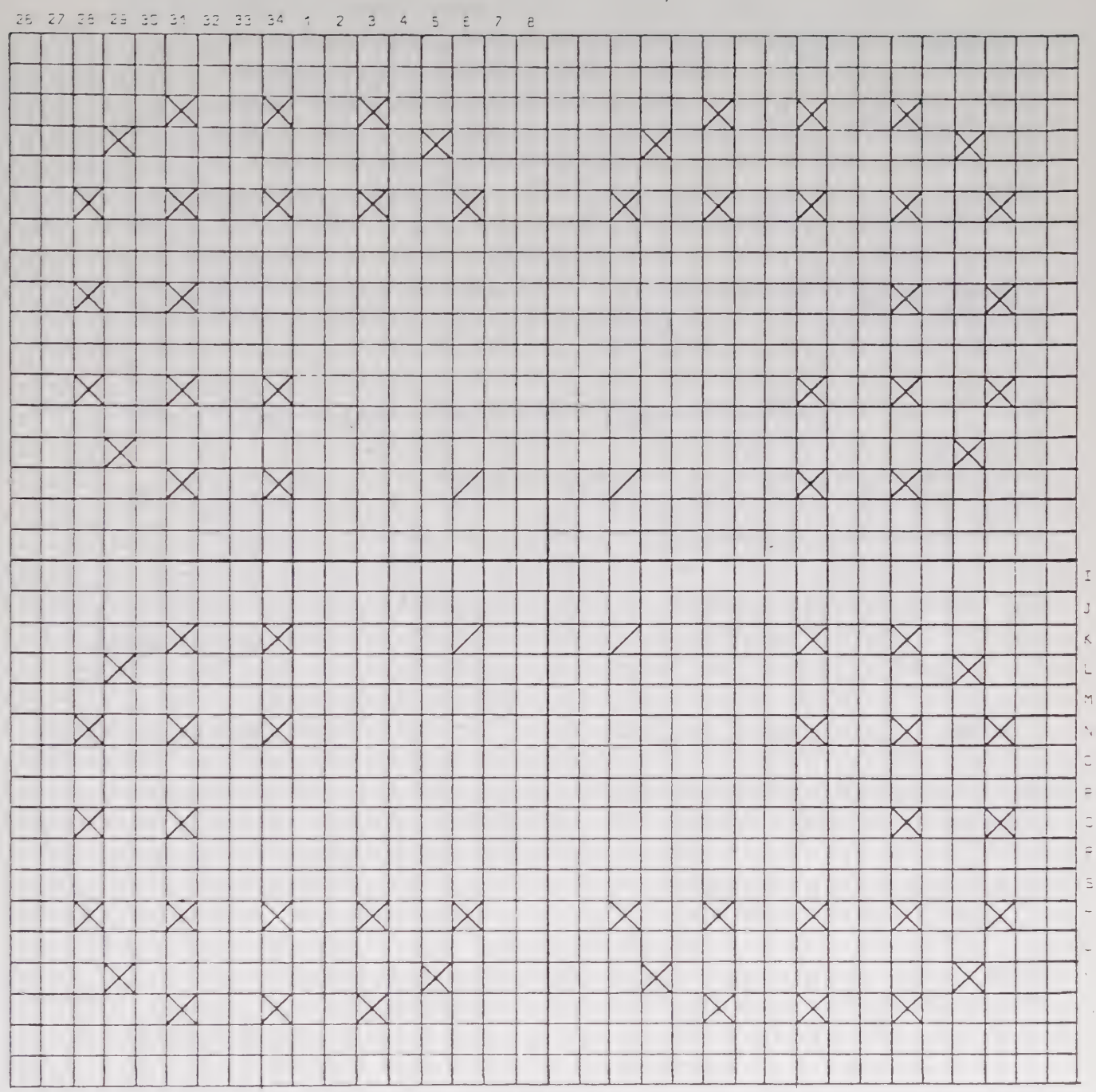


☐ Rayon UO_2 (6,2 %)

☒ Trou d'eau

CONFIGURATION n° 341

4 crayons UO_2-Gd_2O_3



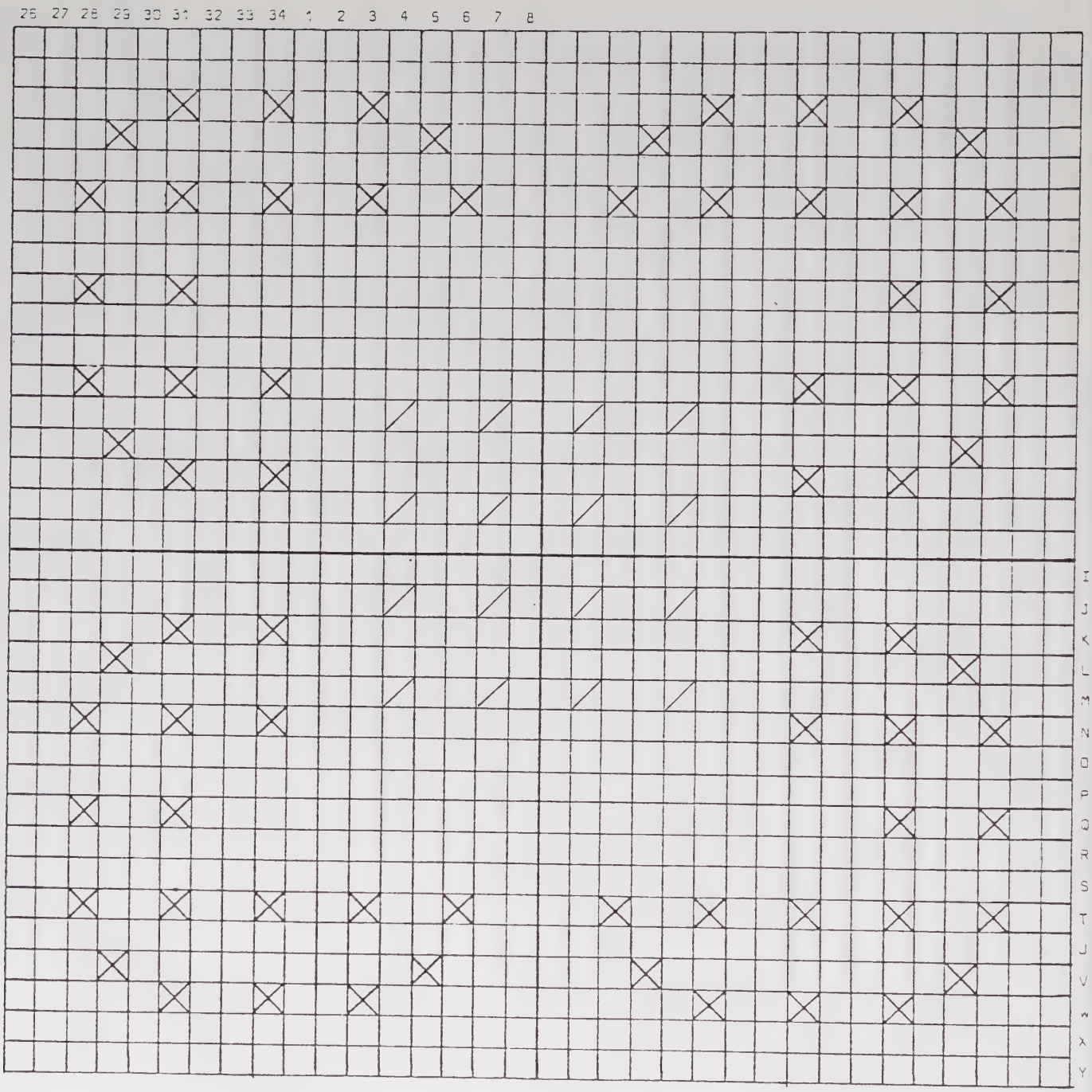
Crayon UO_2 (6,2 %)

Trou d'eau

Crayon UO_2-Gd_2O_3

CONFIGURATION n° 342

16 crayons UO_2-Gd_2O_3



☐ Crayon UO_2 (6,2 %)

☒ Trou d'eau

⧄ Crayon UO_2-Gd_2O_3

1.4.1 Les différentes mesures

Pour chacune des configurations il a été généralement mesuré :
. le titre critique en bore soluble par dosage chimique,
. des distributions de puissance entre différents crayons des assemblages par comparaison de leur activité γ après irradiation,
. des répartition de capture dans l'uranium 238.

1.4.2 Incertitudes expérimentales

Le titre en bore est connu avec une précision de l'ordre de 1,5 % en absolu. Les configurations étant étudiées en relatif par rapport à la configuration de référence, la précision sur la différence des titres est augmentée (de l'ordre de $\pm$ 4 ppm de bore pour les cas envisagés ici, voir annexe A).

Les mesures de répartition de puissance sont connues à $\pm$ 1 %.

Les erreurs sur le facteur de conversion sont un peu plus grandes ; de l'ordre de 2 %.

II METHODE DE CALCUL

2.1 Schéma utilisé

Comme précédemment l'interprétation des résultats expérimentaux a été effectuée à l'aide des modules Apollo et Diane du système neptune, l'équivalence transport diffusion étant assurée, à l'aide du code Equipage.
Les données neutroniques de la partie réflecteur sont déterminées par la méthode décrite précédemment.

Les fuites axiales sont simulées par l'utilisation d'un laplacien axial B_z^2 constant pour toutes les configurations [7] (laplacien qui est pris égal à π^2/H_{ex}^2 avec une hauteur extrapolée H_{ex} égale à 180 + 10 cm).
L'effet des grilles d'aluminium et de la protection n'est pas pris en compte.

Le maillage spatial pour le calcul diffusion est analogue au précédent (une maille par cellule).

Dans un premier temps, nous devons traiter par le module Apollo les hétérogénéités dans leur environnement, c'est-à-dire les trous d'eau et les crayons d'UO_2 - Gd_2O_3.

2.2 Traitement des trous d'eau

Le traitement des trous d'eau a été effectué à l'aide de l'option multicellule ROTH du Code Apollo sur la géométrie suivante.

2	1	2
1	Trou d'eau	1
2	1	2

Nous effectuons ensuite une équivalence transport-diffusion sur le même motif à l'aide du code équipage.

Puisque nous ne nous intéressons qu'à l'aspect gadolinium et que nous effectuons une étude en relatif entre des configurations où nous retrouvons le même nombre de trous d'eau et dans les mêmes positions, nous n'avons pas utilisé de module multicellule plus sophistiqué bien que le module multicellule classique calcule mal la remontée du flux thermique dans le trou d'eau.

2.3 Traitement du poison gadolinié

Le calcul du poison gadolinié dans son environnement doit se faire de manière la plus fine possible. Pour cela nous disposons maintenant en plus du module multicellule classique d'Apollo de plusieurs modules, à savoir :

Eurydice [10]
Option Roth
Roth x 4
DP00
DP01

Nausicaa [11]
Option P0
P1

Nous rappellerons donc brièvement les différentes hypothèses faites dans ces différents modules.

2.4 Les modules multicellule d'Apollo utilisés

Ces modules résolvent l'équation intégrale du transport à l'aide d'une approximation multigroupe et loi de choc isotrope dans une géométrie à 2 dimensions en utilisant un calcul de probabilités de collisions à l'intérieur de chacune des cellules et en faisant

ensuite des approximations sur le couplage neutronique des cellules.

Les cellules carrées (ou rectangulaires) sont découpées en zones internes cylindriques dans lesquelles le flux est supposé plat.

a) Eurydice - Option Roth

C'est l'approximation classique. Le calcul des probabilités de collision s'effectue sur une cellule cylindrique équivalente. Le but de la cylindrisation est de remplacer la surface externe rectangulaire par une surface cylindrique de rayon R^* et la section efficace Σ_t par une section efficace équivalente Σ_t^* ; soit en conservant le volume du milieu externe de la cellule ainsi que sa section efficace macroscopique totale (cylindrisation de Wigner), soit en conservant la surface externe de la cellule ainsi que le bilan matière du milieu externe (cylindrisation d'Askew).

Le nombre de courants d'interface par cellule, qui devrait être de 16 [10], est ramené à un avec la méthode de Roth qui utilise les deux approximations suivantes :

. On remplace le développement double P-1 du flux angulaire de surface par un développement double P-0. On suppose donc que les neutrons entrant dans une cellule le font avec une distribution angulaire isotrope et qu'en conséquence les réflexions de neutrons sur les surfaces externes de l'assemblage sont isotropes.
. On suppose que les courants d'interface sortant des quatre côtés d'une même cellule sont égaux.

Les erreurs particulières à cette méthode sont de deux ordres :

- l'erreur de cylindrisation,
- l'approximation du courant d'interface unique, qui revient à supposer qu'un neutron entrant par une face de la cellule a une probabilité non nulle d'en ressortir sans choc par la même face (effet de retour).

b) Eurydice - Option Roth X 4

Il s'agit d'une approximation multicellule avec cylindrisation mais sans effet de retour. Ceci est obtenu en utilisant quatre courants d'interface entrants par cellule au lieu d'un seul.

La cylindrisation et le développement du flux angulaire de surface s'effectuent comme dans le cas précédent.

c) Eurydice - OPtion DP00

Avec cette option on élimine complètement l'erreur de cylindrisation et l'effet de retour.

On effectue un développement double P0 pour le flux angulaire de surface. Le calcul des probabilités de collisions s'effectue en plusieurs étapes.

Les probabilités de collision sont d'abord calculées sur les N-1 couronnes internes par une méthode unidimensionnelle.

Ensuite, le calcul des probabilités de sortie et de transmission, se fait sur la géométrie exacte à deux dimensions.

d) Eurydice - Option DP01

La seule différence avec le cas précédent réside dans le fait que le flux angulaire de surface est développé en double P1.

e) Nausicaa

Dans Nausicaa les zones de flux plat sont définies en découpant chaque cellule en couronnes homogènes et chacune des couronnes en secteurs azimutaux équi-angulaires. Le couplage entre les cellules s'obtient aussi en faisant une double approximation sur le comportement spatial et angulaire des flux angulaires entrant et sortant de chaque cellule. Nausicaa offre 2 options pour chacune des approximations.

. Approximation du comportement spatial du flux angulaire : on suppose que le flux angulaire est spatialement uniforme soit sur chaque côté de la cellule, soit sur toute la surface de la cellule (Roth).
. Approximation du comportement angulaire du flux angulaire : le flux angulaire peut être isotrope (Nausicaa P0, 1 composant) ou faire l'objet d'un développement P1 (Nausicaa P1, 3 composants).

Dans Nausicaa l'approximation spatiale à 2 dimensions est faite [11], dans la cellule ; et toutes les probabilités sont calculées par intégration numérique dans la vraie géométrie à 2 dimensions de la cellule.

2.5 Normalisation des résultats de distribution de puissance

Les résultats sont normalisés de façon que les sommes des valeurs expérimentales et calculées soient égales.

III BIBLIOTHEQUE UTILISEE

Depuis la première interprétation, des modifications ont été apportées à la bibliothèque de données de base. Les modifications qui nous concernent touchent principalement les isotopes de zirconium, l'uranium 238 et les isotopes de gadolinium.

3.1 Données de base

Nous avons utilisé l'isotope de zirconium autoprotégé, le nouvel isotope d'uranium 238 (N° Appolib 100238 associé à l'isotope effectif n° 2238). Comme nous l'avons vu précédemment pour les isotopes de gadolinium nous disposons aujourd'hui entre autre des deux isotopes impairs 155 et 157 autoprotégés (n° Apollib 100155 et 200157) et des deux isotopes pairs 156 et 158 (n° Apollib 2171 et 2173).

La première interprétation avait été effectuée avec les deux isotopes 155 et 157 non autoprotégés (seuls disponibles à l'époque). Nous avons donc fait plusieurs calculs pour déterminer l'influence de ces différentes données de base. Ces tests ont été menés sur la configuration avec 16 barreaux de poison (N° 342).

Nous avons effectué les trois calculs suivants :

. Utilisation des nouveaux isotopes 155 et 157 (n° Appolib 100155 et 200157) autoprotégés - Calcul 1
. Utilisation des isotopes 155, 157 non autoprotégés (n° Apollib 100155 et 100157) - Calcul 2
. Utilisation des isotopes 155 et 157 autoprotégés (n° Apollib 100155 et 200157) et 156 et 158 (n° Apollib 2171 et 2173) - Calcul 3.

Nous obtenons les résultats suivants pour le calcul du coeur, l'efficacité du Gd étant ici de 3880 pcm :

CALCUL	1	2	3
Valeur propre	1,00528	1,00483	1,00496
$\frac{\Delta (VP)}{VP}$ (pcm)		- 45	- 30
écart sur l'efficacité		+ 1,2 %	+ 0,8 %

Du point de vue des distributions de puissance nous avons comme valeurs (toutes les valeurs calculées sont normalisées de façon que les sommes des valeurs calculées et expérimentales soient égales) :

	1	2	3	4	5	6	7	8
I	expérien. calcul 1 calcul 2 calcul 3							1.358 1.356 1.353 1.353
J							.459 .447 .445 .445	
K						1.328 1.338 1.335 1.334	1.302 1.295 1.291 1.291	
L								
M				.4339 .4250 .4228 .4236				
N								
O								
P	1.179 1.179 1.179 1.179				1.267 1.282 1.281 1.279			

La première conclusion que l'on fera est que l'utilisation des isotopes pairs du gadolinium n'entraîne pas de gros écarts sur la valeur propre et sur la distribution de puissance, pour des coeurs en début de vie. Cette conclusion n'est pas généralisable à un coeur en évolution compte tenu de l'augmentation de la concentration et donc de la capture des isotopes pairs.

Pour la comparaison ancienne bibliothèque - nouvelle bibliothèque, nous observons un écart légèrement plus grand sur la valeur propre ; ainsi que sur la distribution de puissance (tout au moins pour un crayon de Gadolinium : M4).

Nous avons donc dans la suite de l'étude utilisé la nouvelle bibliothèque, sans faire intervenir les isotopes pairs pour des raisons de facilité de calculs notamment en ce qui concerne la création et l'utilisation des sections efficaces condensées en énergie.

3.2 Calcul de l'autoprotection des isotopes résonnants

Rigoureusement l'autoprotection de tous les crayons de notre configuration est différente. L'autoprotection des crayons UO_2 et UO_2 - Gd_2O_3 diffère car la concentration des isotopes résonnants varie de l'UO_2 à l'oxyde gadolinié, et de plus elle change d'un crayon à un autre de même nature, du fait de l'effet Dancoff.

Nous négligerons ce dernier effet et nous ne définirons que deux types d'autoprotection, celle des isotopes des crayons UO_2 et celle des crayons UO_2 - Gd_2O_3.

C'est l'option PIC du code Apollo [3] qui permet de différencier le calcul des sections équivalentes pour deux isotopes ^{235}U et pour deux isotopes ^{238}U dans les deux types de milieu (UO_2 et UO_2 - Gd_2O_3). Nous avons aussi effectué un calcul multicellules avec un seul isotope ^{235}U et ^{228}U afin de déterminer l'écart associé à ce calcul en autoprotection moyenne.

Nous rappelons brièvement que dans le formalisme Apollo le calcul d'autoprotection est scindé en 2 étapes : JEZABEL pour le calcul du facteur de Bell (et de la section équivalente) et BIEFF pour le calcul dans chaque groupe de la section équivalente d'interpolation et des sections autoprotégées. On a donc la possibilité, soit de faire calculer automatiquement l'autoprotection par ces deux sous-programmes, soit d'entrer directement dans BIEFF en imposant le facteur de Bell.

Nous nous intéressons d'abord au calcul JEZABEL en comparant les facteurs de Bell obtenus aux valeurs calculées pour chaque type de cellule en milieu infini.

TYPE D'AUTOPROTECTION		CELLULES EN MILIEU ∞	PIC	AUTOPROTECTION MOYENNE
^{235}U	Milieu UO_2	1,3415	1,3425	1,3409
	Milieu UO_2-Gd_2O_3	1,3414	1,2701	
^{238}U	Milieu UO_2	1,1251	1,1251	1,1250
	Milieu UO_2-Gd_2O_3	1,1250	1,1241	

Nous pouvons faire plusieurs constatations :

. avec les calculs cellules en milieu infini on vérifie que le facteur de Bell varie peu avec la concentration des isotopes, dans la gamme des concentrations en présence (enrichissement à 6,2 % en ^{235}U dans les crayons UO_2 et 5,1 % pour les crayons UO_2 - Gd_2O_3).

. on peut dire que le facteur de Bell du deuxième isotope ^{235}U calculé par l'option PIC semble surprenant. En effet l'écart entre le facteur de Bell du crayon UO_2 et celui du crayon UO_2 - Gd_2O_3 est beaucoup plus grand que ce que logiquement on pourrait attendre compte tenu du fait que la seule caractéristique qui diffère entre ces deux types de crayons est l'enrichissement en Uranium 235 qui comme on l'a vu n'a que peu d'influence, dans notre cas, sur le facteur de Bell.

. avec un seul isotope dans tous les combustibles, le facteur de Bell de l'^{235}U n'est pas très bien calculé, puisque l'on obtient une valeur légèrement inférieure à celle des cellules en milieu ∞ au lieu d'une valeur intermédiaire.

Ces résultats et les recommandations faites par G. GRANGET et A. SANTAMARINA [11] nous amènent pour la suite de l'étude à calculer l'autoprotection de type PIC en imposant dans ces calculs les facteurs de Bell issus d'un calcul cellule en milieu ∞.

3.3 Condensation en énergie de la bibliothèque

Pour des raisons évidentes de coût et de temps de calcul nous avons effectué tous nos calculs avec un nombre réduit de groupes d'énergie.

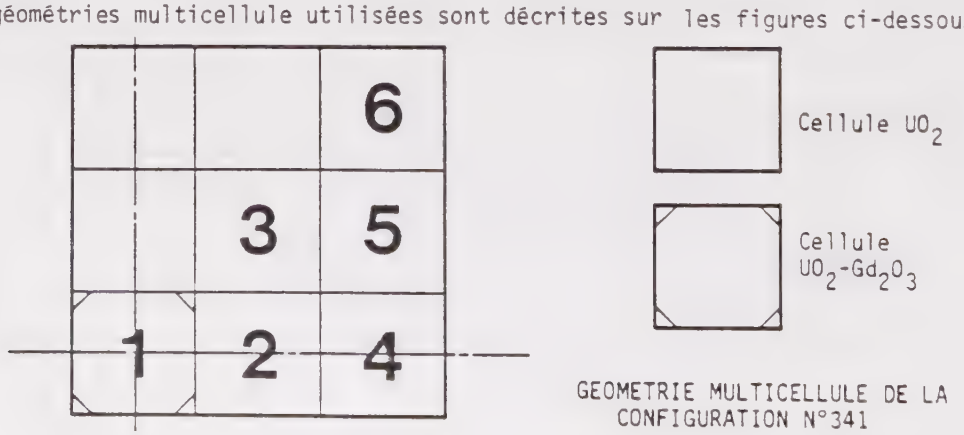
Des calculs et des tests ayant été effectués d'autre part au CEA (DRE-SEN) [12], nous avons utilisé une bibliothèque de sections efficaces condensée à 7 groupes d'énergie dont les limites sont les suivantes :

. 90718 MeV
. 50045 10^{-2} MeV
. 27679 10^{-5} Mev
. 625 10^{-6} MeV
. 352 10^{-6} MeV
. 77001 10^{-7} Mev
. 11 10^{-9} MeV

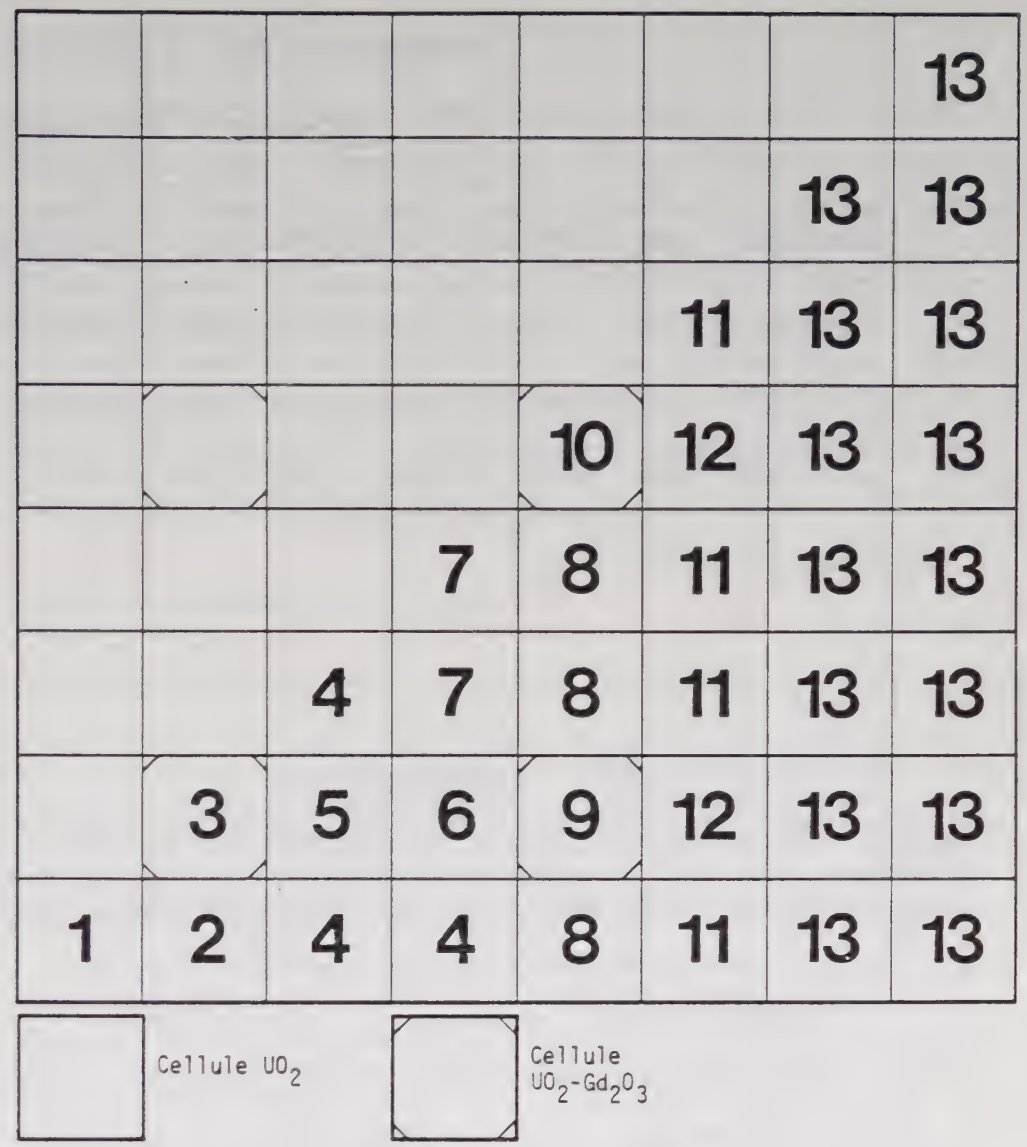
Il y a donc 3 groupes situés dans le domaine rapide et 4 dans le domaine thermique.

Ces condensations ont été effectuées, pour les deux configurations avec poison, grâce à l'option Kéra du Code Apollo et du module multicelle Roth classique.

Les géométries multicellule utilisées sont décrites sur les figures ci-dessous



GEOMETRIE MULTICELLULE DE LA CONFIGURATION N°341



GEOMETRIE MULTICELLULE DE LA CONFIGURATION N° 342

Sur les deux tableaux suivants nous voyons, par la comparaison des taux de fission par cellule, que les erreurs engendrées par cette condensation sont négligeables. On peut voir aussi que le spectre est bien restitué par les calculs à 7 groupes (voir tableau des rapports de flux intégrés par cellule). Nous avons également porté les facteurs de multiplication infini pour les deux configurations, pour les calculs à 7 et 99 groupes, ainsi que l'écart rapporté à l'efficacité des poisons.

CONFIGURATION N° 341

CELLULE N°	1		2		3		4		5		6	
	99	7	99	7	99	7	99	7	99	7	99	7
$\tilde{\phi}_1$	.2688	.2690	.2688	.2689	.2698	.2699	.2703	.2703	.2707	.2707	.2712	.2712
$\tilde{\phi}_2$	.3834	.3834	.3726	.3726	.3711	.3711	.3708	.3709	.3706	.3706	.3705	.3704
$\tilde{\phi}_3$	.2788	.2789	.2679	.2680	.2655	.2656	.2648	.2648	.2641	.2641	.2634	.2635
$\tilde{\phi}_4$	.0689	.0686	.0908	.0905	.0935	.0933	.0941	.0939	.0946	.0945	.0949	.0948

ϕ : flux intégré par cellule $\qquad \tilde{\phi}_i = \dfrac{\phi_i}{\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4}$

CONFIGURATION N° 342

CELLULE N°	1		2		3		4		5		6	
	99	7	99	7	99	7	99	7	99	7	99	7
$\tilde{\phi}_1$	.2701	.2699	.2678	.2677	.2658	.2658	.2693	.2692	.2673	.2673	.2670	.2671
$\tilde{\phi}_2$	.3694	.3701	.3712	.3721	.3824	.3833	.3694	.3702	.3711	.3721	.3712	.3722
$\tilde{\phi}_3$	.2661	.2662	.2695	.2695	.2819	.2818	.2667	.2666	.2699	.2697	.2701	.2698
$\tilde{\phi}_4$	.0944	.0937	.0916	.0907	.0699	.0691	.0946	.0939	.0917	.0908	.0917	.0909

CELLULE N°	7		8		9		10		11		12		13	
	99	7	99	7	99	7	99	7	99	7	99	7	99	7
$\tilde{\phi}_1$	.2689	.2689	.2669	.2670	.2653	.2655	.2655	.2657	.2698	.2699	.2682	.2684	.2720	.2721
$\tilde{\phi}_2$	.3694	.3703	.3716	.3723	.3829	.3835	.3831	.3835	.3702	.3702	.3718	.3719	.3702	.3696
$\tilde{\phi}_3$	.2669	.2668	.2698	.2695	.2819	.2816	.2815	.2812	.2650	.2650	.2676	.2675	.2618	.2620
$\tilde{\phi}_4$	.0947	.0941	.0918	.0912	.0699	.0694	.0699	.0696	.0949	.0948	.0925	.0922	.0961	.0962

. Configuration N° 341

CELLULE	1	2	3	4	5	6
99 groupes	.08088	.94171	.97597	.98492	.99338	1.
7 groupes	.08159	.94070	.97533	.98480	.99331	1.
$\frac{99 - 7}{99}$ %	- .8	.1	.07	.01	.01	0.

- Taux de fission par cellule

. Configuration N° 342

CELLULES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
99 groupes	.90214	.86952	.29847	.91441	.87580	.88184	.92249	.89860	.30687	.30967	.96214	.93049	1.
7 groupes	.89853	.86590	.30017	.91074	.87192	.87808	.91896	.89543	.30870	.31193	.96070	.92870	1.
$\frac{99 - 7}{99}$ %	.4	.4	-.6	.4	.4	.4	.4	.4	-.6	-.7	.1	.2	.0

Taux de fission par cellule

(Normalisation à 1. sur la cellule la moins perturbée)

kinf	CONFIGURATION N° 341	CONFIGURATION N° 342
99 groupes	1,22977	1,22320
7 groupes	1,22962	1,22284
$\frac{\Delta \text{ kinf}}{\text{efficacité}}$	0,2 %	0,3 %

Nous remarquerons que l'écart entre les calculs 99 groupes et 7 groupes est pour les taux de fission positif dans les cellules combustibles et négatif dans les cellules gadolinium. Nous voyons donc que les écarts en relatif entre une cellule Gd et les cellules combustibles voisines peuvent atteindre 1 %, ce qui est tout à fait admissible pour notre étude compte tenu de la précision des calculs et des incertitudes expérimentales.

IV CONFIGURATION DE REFERENCE

4.1 Calculs effectués

Pour mener à bien le calcul du coeur nous avons dû en plus des constantes du réflecteur, effectuer deux calculs de transport avec le code Apollo pour déterminer les sections efficaces des différents types de cellules à un titre en bore de 2180 ppm.

. Un calcul pour les sections efficaces de la cellule UO_2 en milieu infini.
. Un calcul multicellule qui fournit les sections efficaces des deux types de cellule UO_2 entourant le trou d'eau et celle du trou d'eau lui-même (cf § 2.2).

4.2 Résultats

4.2.1 Les effets en réactivité

Pour un titre critique expérimental de 2180 ppm, la valeur propre de référence après le calcul de diffusion est λ = 1,00566.

La valeur de l'efficacité du ppm de bore calculée est de l'ordre de 7,7 pcm/ppm. Elle recoupe la valeur expérimentale qui est de 7,6 pcm $\pm$ 0,5 pcm.

4.2.2 Distribution de puissance

La comparaison expérience calcul est représentée sur le tableau ci-dessous. On obtient dans la zone centrale de mesure du coeur un écart calcul expérience comparable à l'incertitude expérimentale.

Nous observons toutefois pour certaines cellules, une valeur calculée qui sort légèrement des barres d'erreurs, notamment pour les cellules V7 situé à proximité d'un trou d'eau et X27 et Y26 ; ces deux dernières étant situées en coin face au réflecteur.

	1	2	3	4	5	6	7	8
I	1.369 1.365 +0.3	EXPERIE CALCUL E-C/C		1.481 1.501 -1.3				1.593 1.592 +0.1
J								
K	1.488 1.491 -0.1				1.531 1.511 +1.4			
L								
M				1.424 1.417 +0.5				1.500 1.500 0.0
N								
O								
P	1.158 1.152 +0.5					1.322 1.322 +0.0	1.338 1.338 +0.0	1.327 1.346 -1.4
Q								
R								
R								
S								
T			EAU			EAU		
U								
V					EAU		0.904 0.886 +2.0	
W			EAU				0.800 0.799 +0.1	
X							0.741 0.752 -1.5	
Y							0.808 0.810 -0.2	

W 28	X 27	Y 26
0.419 0.421 +0.2	0.347 0.351 -1.3	0.382 0.371 +2.9

4.2.3 Répartition du facteur de conversion

Les écarts expérience-calcul sont portés dans le tableau ci-dessous. Le facteur de conversion étant défini comme le rapport entre les captures dans l'^{238}U et les fissions (^{235}U et ^{238}U) dans les pastilles.

POSITION DANS LE COEUR	Captures ^{238}U			Facteurs de conversion		
	E	C	E-C/C (%)	E	C	E-C/C (%)
P5 Référence	1	1	0	1	1	0
Y6 Face Réflect.	0.467	0.452	+ 3.3	0.746	0.734	+ 1.6
X6 à 1 cellule du réflecteur	0.514	0.501	+ 2.6	0.896	0.869	+ 3.1

Bien qu'il soit difficile de tirer des conclusions, vu le nombre de points de mesure, on note que la répartition des captures dans l'^{238}U n'est pas très bien calculée. Toutefois puisque les points de mesure se situent près du réflecteur où les transitoires de spectre ne sont pas pris en compte, où l'autoprotection de l'^{238}U et ^{235}U n'est plus du tout comparable, du fait de l'effet Dancoff, à celle qui a été calculé pour des cellules en milieu infini, et compte tenu de la méthode de calcul des constantes du réflecteur qui entraîne des erreurs, il semble difficile d'obtenir de meilleurs résultats.

4.3 Conclusions

Etant donné tous ces résultats, on peut considérer que le calcul du coeur sans poison est satisfaisant. Pour la suite on prendra donc, pour les études en relatif pour les configurations avec poisons gadoliniés, ce calcul comme référence.

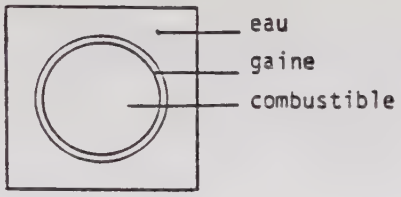
V CONFIGURATION AVEC POISONS SANS INTERACTION

Il s'agit de la configuration où nous avions un seul crayon de poison gadolinié par assemblage (chargement 341 - voir § B 1.3).

5.1 Calculs effectués

Pour cette configuration nous avons dû en plus des calculs cités au paragraphe précédent, effectuer le calcul traitant les crayons de poison dans leur environnement sur la géométrie multicellule décrite au paragraphe B 3.3. Le découpage géométrique des cellules est décrit sur les figures suivantes

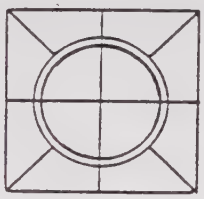
Cellules UO_2-Gd_2O_3



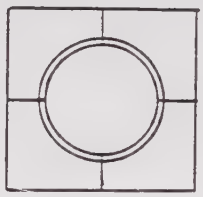
Cellules UO_2

Découpage géométrique des cellules, avec le module Eurydice pour la configuration n° 341

Cellules UO_2-Gd_2O_3



Cellules UO_2 n° 2 - 3



Cellules UO_2 n° 4 - 5 - 6

Découpage géométrique des cellules, avec le module Nausicaa pour la configuration n° 341

Dans tous nos calculs nous avons découpé les crayons de Gadolinium en trois couronnes équivolumiques, ce qui est suffisant comme le montrent les études déjà faites [14].

5.2 Résultats

5.2.1 Effets en réactivité

Comme nous l'avons vu dans la première partie de ce chapitre, nous établissons l'équivalence entre bore soluble et gadolinium afin d'analyser les calculs d'efficacité du poison. Le titre expérimental en bore correspond à 2052 ppm.

Nous rappelons l'expression de l'efficacité du gadolinium pour le chargement i :

$$\mathcal{E}^{i}_{exp} = \frac{1}{2}(T_o - T_i)_{exp} \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_o + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_i\right]_{calcul}$$

T : titre en bore

$\frac{\partial \rho}{\partial T}$: variation de réactivité par ppm de bore.
Une seule mesure de ce paramètre a été effectuée autour du titre 2180 ppm ; nous avons considéré que calcul et expérience auraient été en bon accord quel que soit le chargement.

Indice o : chargement de référence.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau ci-dessous (en fonction du module du calcul de transport utilisé pour le traitement du poison dans son environnement).

Pour cette configuration l'efficacité $\mathcal{E}^{i}_{exp}$ est égale à - 998 pcm.

MODULE DU CALCUL TRANSPORT	EURYDICE ROTH	EURYDICE ROTH x 4	EURYDICE DP00	EURYDICE DP01	NAUSICAA P0	NAUSICAA P1
Valeur propre	1,00498	1,00476	1,00470	1,00448	1,00507	1,00480
$\Delta \varepsilon$ (pcm)	- 68	- 90	- 96	- 117	- 59	- 85

avec $\Delta\varepsilon = 10^5 \text{ Log } \frac{\lambda i}{\lambda o}$

λ_o : valeur propre de la configuration de référence

λ_i : valeur propre de la configuration étudiée.

La valeur de l'efficacité du ppm de bore calculée est de $\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_i$ = - 7,9 pcm/ppm

Pour cette configuration nous avons la possibilité de déterminer l'influence de l'ordre de développement du flux angulaire de surface.
Ainsi nous pouvons voir que pour le module Nausicaa l'effet P0/P1 représente enviton 2,5 % de l'antiréactivité totale (ce qui rejoint les ordres de grandeur déjà donnés [15]).

De même pour le module Eurydice l'effet DP00/DP01 peut être chiffré à 2,2 % de l'antiréactivité totale du poison gadolinié.

On constate donc que l'influence du développement angulaire du flux de surface isotrope ou anisotrope n'est pas négligeable.

5.2.2 Distribution de puissance

Les distributions de puissance expérimentales et calculées sont représentées dans les tableaux ci-après. Nous observons que lorsque l'on utilise pour le calcul de transport le module multicellule classique nous obtenons des écarts expérience calcul avoisinant les 2 % dans le crayon de Gadolinium. Cet écart est sensiblement diminué avec le module Roth x 4, bien qu'il reste dans certains crayons des écarts supérieurs à 1 % (notament dans le crayon de Gadolinium et son voisin).

Avec l'utilisation des modules Eurydice DP00 et DP01 nous arrivons à réduire, dans le crayon de Gadolinium, l'écart expérience-calcul à moins de 1 %. Toutefois nous constatons que dans le crayon avoisinant le Gadolinium, nous avons encore un écart supérieur aux incertitudes expérimentales. Ce n'est qu'avec l'utilisation du module Nausicaa que nous obtenons en tout point un accord calcul expérience compatible avec les marges d'incertitudes expérimentales.

5.2.3 Facteur de conversion et répartition des captures dans l'uranium 238

Dans le tableau ci-après nous pouvons voir les résultats obtenus suivant les différents modules de calcul utilisés pour le calcul de transport.
P5 correspond à la référence étant situé dans une zone peu perturbée.
K6 correspond au crayon de gadolinium.
K5 correspond au crayon qui fait face au crayon de gadolinium.
Bien qu'il soit difficile de conclure de manière très nette étant donnés les incertitudes expérimentales et le faible nombre de mesure, on peut voir que globalement quelque soit le module utilisé, pour le calcul de transport, les résultats ne sont pas améliorés de manière déterminante.

On observera que le facteur de conversion dans le crayon de Gadolinium continue à être mal calculé. Pour le reste nous noterons un bon accord calcul expérience (notament avec les modules Eurydice DP01 et Nausicaa).

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.530 1.536 -0.4
J							1.489 1.488 +0.1	
K						0.490 0.481 +1.9	1.407 1.421 -1.0	
L								
M								
N								
O								
P	1.161 1.160 +0.1				1.291 1.296 -0.4			

CONFIGURATION HC341-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE ROTH)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.530 1.535 -0.3
J							1.489 1.490 -0.1	
K						0.490 0.488 +0.4	1.407 1.422 -1.0	
L								
M								
N								
O								
P	1.161 1.155 +0.5				1.291 1.293 -0.2			

CONFIGURATION HC341-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL DE TRANSPORT : EURYDICE ROTH X 4)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.530 1.533 -0.2
J							1.489 1.482 +0.5	
K						0.490 0.488 +0.4	1.407 1.423 -1.1	
L								
M								
N								
O								
P	1.161 1.152 +0.8				1.291 1.290 +0.1			

CONFIGURATION N°341-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE DP00)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.530 1.529 +0.7
J							1.489 1.484 +0.3	
K						0.490 0.488 +0.4	1.407 1.423 -1.1	
L								
M								
N								
O								
P	1.161 1.153 +0.7				1.291 1.291 0.0			

CONFIGURATION N°341-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE DP01)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.530 1.536 +0.4
J							1.489 1.486 +0.2	
K						0.490 0.486 +0.8	1.407 1.419 +0.8	
L								
M								
N								
O								
P	1.161 1.150 +0.9				1.291 1.290 0.1			

CONFIGURATION N°341-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : NAUSICAA P0)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.530 1.531 +0.1
J							1.489 1.488 0.0	
K						0.490 0.486 +0.8	1.407 1.419 +0.8	
L								
M								
N								
O								
P	1.161 1.153 +0.7				1.291 1.291 0.0			

CONFIGURATION N°341-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : NAUSICAA P1)

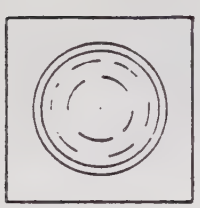
CONF 341		CAPTURES U8			FACTEUR DE CONVERSION		
MODULE DU CALCUL DE TRANSPORT		E	C	E-C/E %	E	C	E-C/E %
Roth	P5	1	1	0	1	1	0
	K5	1.126	1.126	0	1.070	1.054	+ 1.5
	K6	.976	.990	- 1.4	2.550	2.652	- 4.0
Roth x 4	P5	1	1	0	1	1	0
	K5	1.126	1.126	0	1.070	1.048	+ 2.1
	K6	.976	.997	- 2.2	2.550	2.663	- 4.4
DP00	P5	1	1	0	1	1	0
	K5	1.126	1.129	- 0.3	1.070	1.051	+ 1.8
	K6	.976	.997	- 2.2	2.550	2.633	- 3.3
DP01	P5	1	1	0	1	1	0
	K5	1.126	1.128	- 0.2	1.070	1.051	+ 1.8
	K6	.976	.995	- 1.9	2.550	2.631	- 3.2
Naus P0	P5	1	1	0	1	1	0
	K5	1.126	1.129	- 0.3	1.070	1.052	+ 1.7
	K6	.976	.994	- 1.8	2.550	2.640	- 3.5
Naus P1	P5	1	1	0	1	1	0
	K5	1.126	1.127	- 0.1	1.070	1.052	+ 1.7
	K6	.976	.992	- 1.6	2.550	2.637	- 3.4

VI CONFIGURATION AVEC POISONS EN INTERACTION

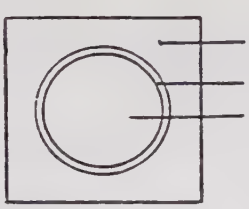
Nous étudierons ici la configuration avec quatre crayons de poisons gadoliniés par assemblage (chargement N° 342 - voir § B 1.3).

6.1 Calculs effectués

Nous avons comme pour la configuration précédente effectué un calcul traitant les crayons de poison dans leur environnement. La géométrie multicellule est décrite au paragraphe B 3.3. Le découpage géométrique des cellules est décrit sur les figures suivantes :

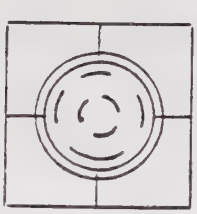


Cellules UO_2-Gd_2O_3

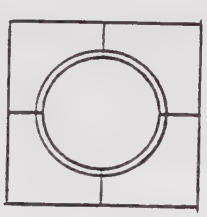


Cellules UO_2

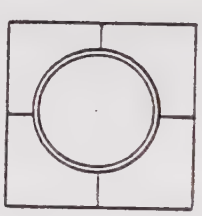
Découpage géométrique des cellules, avec le module Eurydice pour la configuration n° 342



Cellules UO_2-Gd_2O_3

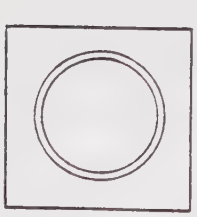


Cellules UO_2
n° 1.2.4.6.7.8.11



Cellule UO_2
n° 5 - 12

Découpage géométrique des cellules, avec le module Nausicaa pour la configuration n° 342



Cellules UO_2
n° 13

Pour le cas envisagé ici nous n'avons pas pu utiliser le module Eurydice option DPO1 étant donné les contraintes sur le nombre de courants d'interface liées à l'écriture du module. L'utilisation du module Nausicaa option P1 n'a pas été possible puisque nous avons dû employer l'option mélange du module, vu le nombre important de cellules décrites, ce qui ne permet pas le développement en P1 du flux angulaire.

6.2 Résultats

6.2.1 Effets en réactivité

Pour cette configuration le titre en bore expérimental est de 1695 ppm.

Les résultats obtenus sont exposés dans le tableau suivant. L'efficacité ε^{i}_{exp} est ici de - 3880 pcm.

MODULE DU CALCUL TRANSPORT	EURYDICE ROTH	EURYDICE ROTH x 4	EURYDICE DP00	NAUSICAA P0
Valeur propre	1,00528	1,00479	1,00425	1,00469
$\Delta \varepsilon^{i}$ (pcm)	- 38	- 87	- 140	- 97

L'efficacité du ppm de bore est égale à - 8,3 pcm/ppm.

6.2.2 Distribution de puissance

Les distributions de puissance calculées et expérimentales sont portées sur les tableaux ci-après.

Nous constatons comme précédement, que l'utilisation pour le calcul de transport du module Eurydice Roth entraîne des écarts de plus de 2 % dans les crayons de Gadolinium. Ici aussi nous observons que l'emploi du module Eurydice Roth x 4 diminue considérablement ces écarts. Avec les modules Eurydice DP00 et Nausicaa P0 ces écarts sont légèrement réduits.

6.2.3 Facteur de conversion et répartition des captures dans l'uranium 238

Aucune mesure de ces paramètres n'ayant été effectuée pour cette configuration, nous n'avons donc pas procédé à une comparaison calcul expérience.

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.358 1.356 +0.2
J							0.459 0.447 +2.6	
K						1.328 1.338 -0.8	1.302 1.295 +0.6	
L								
M				0.434 0.425 +2.1				
N								
O								
P	1.174 1.174 0.0				1.267 1.282 -1.2			

CONFIGURATION N°342-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE ROTH)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.358 1.356 +0.2
J							0.459 0.456 +0.7	
K						1.328 1.334 -0.5	1.302 1.295 +0.6	
L								
M				0.434 0.431 +0.6				
N								
O								
P	1.174 1.174 0.0				1.267 1.274 +0.6			

CONFIGURATION N°342-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE ROTH X 4)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.358 1.352 0.0
J							0.459 0.459 0.0	
K						1.328 1.335 -0.5	1.302 1.303 -0.1	
L								
M				0.434 0.432 +0.3				
N								
O								
P	1.174 1.168 +0.5				1.267 1.268 -0.1			

CONFIGURATION N°342-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE DP00)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.358 1.359 0.0
J							0.459 0.458 +0.2	
K						1.328 1.334 -0.5	1.302 1.306 -0.3	
L								
M				0.434 0.432 +0.3				
N								
O								
P	1.174 1.176 -0.2				1.267 1.256 +0.9			

CONFIGURATION N°342-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : NAUSICAA P0)

6.2.4 Influence de la variation de la charge en Gadolinium

Etant donné les incertitudes qui peuvent exister sur la teneur en gadolinium, nous avons voulu évaluer la variation d'efficacité entraînée par une variation de charge Δm autour de la charge nominale. Nous avons procédé à un calcul concernant le chargement N° 342 en utilisant pour le calcul de transport le module Nausicaa et en diminuant les concentrations des isotopes de Gadolinium de 3 %, ce qui est une variation supérieure aux incertitudes généralement annoncées ($\pm$ 1 %) sur les teneurs nominales.

Nous enregistrons alors une variation de la valeur propre pour le coeur de 30 pcm, ce qui représente 0,7 % de l'efficacité des crayons absorbants, et nous n'avons aucune répercussion sur la distribution de puissance.

De manière identique nous pouvons dire qu'une variation uniforme de 3 % des sections efficaces macroscopiques du Gd n'entraîne pas des modifications très importantes des paramètres mesurés.

VII ANALYSE DES RESULTATS

Pour les deux configurations avec poison étudiés il peut sembler en première analyse, paradoxal d'enregistrer des écarts sur la valeur propre, par rapport à la configuration de référence, plus grands lorsque l'on utilise des modules de calcul de transport plus perfectionnés que le module Roth classique. Ces écarts vont d'environ 7 % à 12 % pour la configuration N° 341 et de 1 % à 3,6 % pour la configuration N° 342.

Ceci est d'autant plus surprenant que l'on observe, au niveau de la distribution de puissance près des hétérogénéités une nette réduction des écarts expérience calcul allant de pair avec l'amélioration du traitement spatial des modes de transport.

En particulier, la distribution azimutale autour du barreau empoisonné est parfaitement restituée par les calculs Nausicaa.

L'activité γ dans le poison lui-même semble elle aussi mieux restituée par les calculs les plus perfectionnés. Il faut cependant nuancer ce résultat en précisant que la mesure par γ scanning permet (abstraction faite de la légère différence d'enrichissement) d'obtenir une distribution relative des taux de fission. L'efficacité de l'absorbant est-elle à relier en revanche au taux d'absorption du gadolinium.

On trouvera dans le tableau ci-dessous la répartition par domaine d'énergie des taux d'absorption et de fission dans les différents barreaux.

	Absorptions dans le barreau d'UO_2-Gd_2O_3	Fissions dans le barreau d'UO_2-Gd_2O_3	Fissions dans le barreau d'UO_2
1	2,2 %	16,2 %	6,4 %
2	2,2 %	4,6 %	2,1 %
3	22,5 %	43,6 %	18,8 %
4	73,1 %	35,6 %	72,7 %

On constate que pour des crayons UO_2 environ 73 % des fissions sont thermiques et 20 % épithermiques, alors que dans le crayon empoisonné ces chiffres deviennent 36 et 44 %.

L'absorption du gadolinium est due essentiellement aux domaines thermique (73 %) et épithermique (22 %). L'amélioration de la distribution des taux de fission ne peut donc être strictement assimilée à un meilleur calcul de l'absorption du poison.

Un écart de 1 % sur le niveau de flux thermique dans le crayon empoisonné se traduira par 0,7 % d'écart sur l'efficacité du Gadolinium mais seulement par 0,3 % sur l'activité mesurée.

Néanmoins, compte tenu de l'excellente précision obtenue sur la distribution des activités calculées on peut conclure que l'absorption du crayon gadolinié est calculée avec une incertitude qui ne doit guère dépasser quelques pour cent.
Or, une interprétation par trop rapide des résultats précédents, fondée sur la seule dérive de valeur propre entre la référence et les configurations empoisonnées (341 et 342) laisserait apparaître des écarts sur l'efficacité respectivement de 12 % et 3,6 % incompatible avec l'analyse que nous venons de faire.

L'hypothèse la plus vraissemblable et que nous avons retenue à priori consiste à penser que les résultats globaux que sont les dérives de valeur propre calculées résultent de la compensation de plusieurs erreurs, les unes relatives au calcul local et les autres au calcul du coeur.

Parmi les causes d'erreur succeptibles de fausser le résultat au niveau du calcul coeur, la plus importante nous semble être le traitement par la théorie de la diffusion de l'interface coeur-réflecteur. Des études (voir § A 3.2) ont en effet montré clairement que le taux de fuite radial (très important pour des configurations de taille aussi faible) était mal pris en compte par le schéma que nous venons d'utiliser.

En particulier, l'obtention des constantes de réflecteur ne repose sur aucun formalisme sérieux. Afin de confirmer cette hypothèse, nous avons entrepris (pour le cas le plus délicat : configuration N° 341) une interprétation mettant en oeuvre un calcul de transport au niveau du coeur.

C - INTERPRETATION DES EXPERIENCES "AZUR-CAP 1800" RELATIVES AUX CRAYONS D'UO_2-Gd_2O_3 PAR UN CALCUL DE TRANSPORT

Le schéma utilisé dans le paragraphe précédent peut conduire à une mauvaise estimation des fuites sur le coeur. L'étude du coeur Caramel à plaques [6] qui est de taille semblable a montré en effet que cette procédure de calcul conduit a une dérive de la valeur propre en fonction de la taille du coeur.

Les causes essentielles de cette dérive peuvent être :
. la théorie de la diffusion (Loi de Fick),
. la méthode de détermination des constantes de réflecteur,
. la condensation des sections efficaces sur un spectre assymptotique.

Les travaux menés sur le coeur caramel, ont montré que la dérive de valeur propre en fonction de la taille du coeur disparaissait avec le calcul de coeur en transport [16].

Pour confirmer l'hypothèse faite précédemment sur le calcul du taux de fuite radial, il faudrait que l'écart sur la valeur propre, entre le calcul de diffusion et le calcul de transport, ne soit pas le même pour la configuration N° 340 (référence) et pour la configuration N° 341.

Bien qu'une telle méthode ne puisse être employée pour une étude de projet, nous avons calculé les deux configurations en théorie du transport. Ceci pour séparer les effets dus au calcul local et au calcul de coeur, car l'objet essentiel de notre travail ne se limite pas à la comparaison calcul-expérience sur les diverses configurations mais consiste à déterminer la validité du schéma de calcul en s'affranchissant dans la mesure du possible des problèmes particuliers, que présente l'interprétation d'expériences critiques de petite taille. Pour une telle étude nous devons utiliser un code de transport à deux dimensions permettant de traiter un grand nombre de régions physiques, compte-tenu du nombre de crayons présents dans le coeur.

Le code Dot ([2] et chapitre I) dont nous disposons répond à cette nécessité.

Les calculs de transport Dot seront faits à un nombre de groupes réduits pour des raisons de coût. Les groupes retenus sont ceux utilisés dans la partie B de ce même chapitre.

Dot est un code à deux dimensions, XY, (RZ ou RO). Nous ne pourrons pas d'écrire la géométrie exacte de chaque cellule (crayon cylindrique, gaine, lame d'eau). On doit donc, pour effectuer le calcul de coeur, disposer de sections efficaces condensées et représentant les cellules homogénéisées.

La procédure de calcul comporte deux étapes :

. Une première partie concerne la constitution de la bibliothèque de données de base, à 7 groupes d'énergie et homogène pour chaque type de cellule, ce qui nécessite l'emploi d'une méthode d'équivalence transport-transport (option SPH du code Apollo) puisqu'une homogénéisation par pondération par les flux et volume n'est pas rigoureuse dans le cas d'une géométrie multicellule. Les tests numériques effectués pour chaque motif géométrique en vue de déterminer la validité des bibliothèques sont aussi présentés.

. Une deuxième partie consiste dans l'interprétation proprement dite des expériences.

I CONSTITUTION DE LA BIBLIOTHEQUE

Pour fabriquer les isotopes dont les sections efficaces seront homogénéisées en espace et condensées en énergie, il est bien évident que le flux d'homogénéisation et le spectre de condensation doivent être le plus proche possible de la réalité.

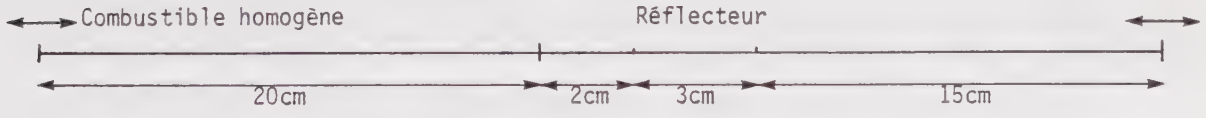
Le calcul des configurations envisagées nous oblige à traiter quatre types de cellules combustibles, à savoir :

. La cellule assymptotique obtenue par un calcul de transport de cellule en milieu infini.

. Les paramètres neutroniques des cellules entourant les trous d'eau et des trous d'eau eux mêmes, seront issus d'un calcul Apollo effectué sur la géométrie multicellule définie au § B 2.2.

. Les cellules de poison gadolinié et leurs cellules voisines dont les constantes seront fournies par un calcul de transport effectué sur la géométrie multicellule défini au § B 3.3 pour la configuration 341.

. Enfin les sections efficaces condensées de l'eau et du bore pour le réflecteur seront issues d'un calcul de transport traverse sur la géométrie suivante :



La condensation dans le réflecteur se fait sur trois zones de 2 cm, 3 cm et 15 cm ; pour tenir compte de la variation du spectre à l'interface coeur réflecteur.

Les calculs multicellules ont été faits à l'aide du module Eurydice option Rothx4, puisque nous avons vu qu'il permettait de restituer correctement les variations spatiales du flux.

Les sections efficaces homogénéisées et condensées ainsi obtenues doivent restituer les bons taux de réactions par cellule, c'est-à-dire ceux que nous avons lors du calcul hétérogène et à 99 groupes.

La méthode la plus simple pour l'homogénéisation consiste à pondérer les sections efficaces du calcul Apollo par les flux et à effectuer une sommation sur les macro-zones (volume Vi, dans notre cas ce sera la somme des volumes des cellules élémentaires) et les macro-groupes (de léthargies limite u_k) lorsque l'on condense en énergie. Si l'on pose pour le flux moyen [10]

$$\bar{\phi}_i\ (k) = \frac{1}{V_i} \int_{u_{k-1}}^{u_k} du \int_{V_i} d^3r \quad \phi\ (\vec{r}, u),$$

Cette homogénéisation, que nous appellerons homogénéisation directe, sera définie par :

$$\bar{\Sigma}_i\ (k) = \frac{1}{V_i\ \bar{\phi}_i(k)} \int_{u_{k-1}}^{u_k} du \int_{V_i} d^3r\ \ \Sigma\ (\vec{r}, u)\ \ \phi\ (\vec{r}, u)$$

$\bar{\Sigma}_i$: section efficace macroscopique homogénéisée pour la macro-zone i

Σ : section efficace macroscopique

Considérons l'équation intégrale du transport [16] :

$$\phi\ (\vec{r}, \vec{s}) = \int_0^{\infty} e^{-\tilde{\Sigma}_t s}\ \ q\ (\vec{r} - s\vec{\Omega}, \vec{\Omega})\ ds$$

avec $$q\ (\vec{r}, \vec{\Omega}) = \int_{4\Pi} \Sigma_s\ (\vec{r}, \vec{\Omega}', \vec{\Omega})\ \phi\ (\vec{r}. \vec{\Omega}')\ d^2\Omega' + S\ (\vec{r}, \vec{\Omega})$$

et $$\tilde{\Sigma}_t s = \int_M^A \Sigma_t\ (\vec{r})\ ds \qquad \text{(parcours optique)}$$

Nous voyons que la présence des sections efficaces macroscopiques totales dans le terme de parcours optique rend l'équation du transport non linéaire par rapport à une variation d'une section efficace macroscopique totale.

Donc l'homogénéisation directe ne permet pas de conserver les taux de réaction, sauf dans certain cas particuliers (par exemple lorsque nous n'avons qu'une seule macro-zone [10]).

Une méthode d'équivalence s'impose donc pour pouvoir retrouver en géométrie homogène à peu de groupes les taux de réaction du calcul en géométrie hétérogène et à 99 groupes. La méthode utilisée sera la méthode SPH2 [10], intégrée au module Eurydice [10] du code Apollo. Nous rappelons donc brièvement en quoi consiste cette méthode.

1.1 Méthode d'équivalence SPH2

Cette méthode permet de respecter l'équivalence entre les deux calculs suivants :

. Un calcul fin permettant d'obtenir, en théorie du transport, une distribution de flux neutronique sur une géométrie détaillée de l'assemblage et sur un grand nombre de groupes d'énergie.

. Un macro calcul utilisant des propriétés nucléaires effectives homogénéisées sur une géométrie simplifiée du même assemblage et condensée sur quelques macro-groupes.

Le principe d'équivalence s'exprime ainsi :

Les propriétés nucléaires effectives seront celles qui assureront que le calcul fin et le macro-calcul donnent les mêmes taux de réaction.

Pour cette méthode d'homogénéisation par équivalence on définit, pour chaque macro-groupe, un ensemble de paramètres de correction $\vec{\mu}$ qui multiplieront les sections efficaces macroscopiques obtenues par homogénéisation directe sur les N cellules de la multicellule

$$\tilde{\Sigma}_i = \mu_i \ \Sigma_i \quad , \qquad i = 1, N$$

La méthode d'équivalence consiste donc pour chaque macro-groupe k, à trouver l'ensemble de paramètres de correction $\vec{\mu}\ (k) = \vec{\mu}_i\ (k)$; $\mu_i = 1, N$
tel que $T_i\ (\mu, k) = T_i^*\ (k)$; $i = 1,N$
où $T_i^*\ (k)$ est obtenu par le calcul fin, et $T_i\ (\vec{\mu}, k)$ est obtenu par le macro calcul.

Une fois ces paramètres déterminés, on obtiendra pour chaque volume de la géométrie simplifiée un flux moyen donné par

$$\tilde{\Phi}_i\ (k) = \frac{1}{\mu_i(k)} \ \bar{\Phi}_i\ (k)$$

où $\bar{\Phi}_i\ (k)$ est le flux moyen obtenu par homogénéisation directe.

On voit donc que les taux de réaction du macro-calcul respecteront les différents taux de réaction si toutes les propriétés nucléaires sont corrigées de la même façon que les sections efficaces macroscopiques totales.

1.2 Tests numériques

Après avoir constitué les bibliothèques suivant la méthode exposée ci-dessus, nous avons effectué des calculs de vérification permettant de tester la précision des paramètres précédemment calculés. Ces calculs de vérification utilisent le code Apollo à 7 groupes d'énergie dans l'approximation Roth x4 sur les géométries multicellules ayant permis la création de la bibliothèque, les cellules étant ici homogènes.

Dans les tableaux qui suivent sont portés les taux d'absorption intégrés sur tout le domaine d'énergie et sur chaque cellule, pour les calculs à 99 groupes en géométrie hétérogène et pour les calculs à 7 groupes en géométrie homogène.

Nous indiquons également les valeurs du facteur de multiplication infini, $k\infty = \frac{\text{somme des productions}}{\text{somme des absorptions}}$, pour les deux types de cellules.

Les tableaux correspondent aux types de calcul multicellule que nous avons effectués pour cette étude.

.Les trous d'eau dans leur environnement : nous ne portons que les valeurs pour le trou d'eau de la configuration de référence. Les écarts pour l'autre configuration sont du même ordre de grandeur.

	Calcul hétérogène 99 groupes	Calcul homogène 7 groupes	Δ (pcm)
k infini	1.25583	1.25586	2

Pour les taux d'absorption nous avons

Cellule n°	Calcul hétérogène 99 groupes	Calcul homogène 7 groupes	δ (%)
1	0.39039	0.39067	0.07
2	0.37356	0.37379	0.06
3	0.03257	0.03259	0.06

. Le crayon de poison gadolinié dans son environnement pour la configuration N° 341 :

	Calcul hétérogène 99 groupes	Calcul homogène 7 groupes	Δ (pcm)
k infini	1.23005	1.23007	2

Les taux d'absorption sont les suivants :

Cellule n°	Calcul hétérogène 99 groupes	Calcul homogène 7 groupes	δ (%)
1	0.40615	0.40594	0.051
2	0.24554	0.24530	0.098
3	0.25294	0.25304	0.040
4	0.25488	0.25474	0.055
5	0.25671	0.25661	0.039
6	0.25814	0.25810	0.016

Nous pouvons constater les faibles écarts dans toutes les cellules y compris la cellule n° 1 dans laquelle se trouve le crayon de poison gadolinié.

Nous constatons que nos bibliothèques ont été correctement fabriquées. On peut donc maintenant passer au calcul du coeur avec le code Dot.

II RESULTATS

Nous savons toute l'importance dela discrétisation spatiale et angulaire pour un calcul Dot. Nous avons effectué différents tests au niveau des géométries élémentaires (géométrie multicellule pour le trou d'eau et le poison gadolinié) pour déterminer l'optimum, en fonction du coût et de la précision, de celles-ci.

Il apparait qu'un calcul effectué avec 2 points de calcul par cellule dans les directions x et y, et avec l'option S4 (12 directions angulaires) est suffisant.

2.1 Configuration de référence

2.1.1 Effets en réactivité

A l'issue du calcul detransport nous obtenons une valeur propre de 1,01445.

Cette valeur est très supérieure à celle du calcul de diffusion, puisque nous avions 1,00566.
Pour expliquer cet écart, on va séparer les causes éventuelles. En particulier, on détermine l'effet lié au traitement de la zone combustible et du réflecteur.

Nous comparons donc le facteur de multiplication infini de la zone combustible pour les calculs de diffusion et de transport.

	DOT	DIANE	Δ (pcm)
$\overline{k}_\infty$	1.26619	1.26592	21

$$\overline{k}_\infty = \frac{\int_{coeur} \nu\Sigma f \, \phi \, dV}{\int_{coeur} \Sigma_a \, \phi \, dV + \text{Fuites axiales}}$$

Pour le rapport absorption réflecteur/absorption totale le calcul de diffusion et le calcul de transport donnent :

0.19130 (DOT)

0.19794 (DIANE)

La cause essentielle des écarts semble donc en grande partie liée au traitement du réflecteur.

Pour analyser de manière plus fine les raisons de ces écarts, nous avons effectué des calculs à une dimension traitant une traverse combustible réfecteur avec le code Dot et le code Diane.

Pour les deux calculs nous avons adopté un maillage spatial identique.

Du point de vue des valeurs propres et des facteurs de multiplication infinis (zone combustible) on obtient :

Valeur propre	DOT	DIANE	Δ (pcm)
	0.92623	0.90755	2037
k_∞ (comb)	1.28798	1.28772	20
$\vec{J}$	0.28087	0.29523	-

$$\vec{J} = 1 - \frac{\lambda}{k_\infty}$$

(courant net de neutrons sortant du combustible)

Les mêmes effets, que précédemment pour le coeur, sont observés ici.

(Remarque : Pour ce calcul à une dimension, la sensibilité à la discrétisation spatiale et angulaire pour le calcul Dot a aussi été testée. Une discrétisation spatiale plus fine, ainsi qu'un calcul fait avec l'option S8 (40 directions angulaires), n'entraîne pas de variation notable).

Les effets à l'interface combustible réflecteur ont été examinés plus précisément par la comparaison des courants. Le courant $\vec{J}$ est défini comme le nombre de neutrons traversant globalement une surface σ de normale $\vec{N}$. La surface σ sera l'interface combustible réflecteur, la normale $\vec{N}$ étant orientée dans le sens combustible réflecteur.

Nous calculons ces courants nets, pour les quatre macrogroupes classiques, pour les traverses à une dimension traitées avec Dot et Diane.

	Dot	Diane
J1	+ 0.15972	+ 0.17707
J2	+ 0.11252	+ 0.12382
J3	+ 0.03373	+ 0.02780
J4	- 0.02510	- 0.03346
$\vec{J}$	+ 0.28087	+ 0.29523

Courants par groupe normalisés à 1 neutron source.

$\vec{J} = J_1 + J_2 + J_3 + J_4$

Globalement, le courant net $\vec{J}$ intégré sur tout le domaine d'énergie est cohérent avec celui déterminé précédemment.

Nous constatons que les courants dans les groupes 1 et 2 sont nettement surestimés par le calcul Diane. On voit qu'il en est de même pour le courant total $\vec{J}$. L'écart sur $\vec{J}$ entre le calcul de diffusion et le calcul de transport est d'environ 5,0 %.

On voit donc que sur nos réseaux on pourra ainsi avoir des écarts de plusieurs centaines de pcm.

On peut donc conclure que c'est la surestimation des fuites dans le réflecteur par le calcul Diane qui est la cause majeure de l'écart enregistré sur la valeur propre entre le calcul de transport et le calcul de diffusion.

2.1.2 Distributions de puissance

Les distributions de puissance expériemental et calculée avec le code Dot sont portées sur le tableau suivant.

On voit que dans la zone centrale on obtient un très bon accord calcul expérience.

Les points à proximité du réflecteur sont très nettement en dehors des fourchettes d'incertitudes expérimentales (notamment en W28, X27, Y26).
Ceci peut être dû à deux effets :

. un effet d'homogénéisation : les cellules du coeur sont traitées comme des zones homogènes ce qui va entrainer des erreurs qui seront plus importantes en périphérie qu'au centre,

	1	2	3	4	5	6	7	8
I	1.369 1.370 +0.0	EXPERIE CALCUL E-C/C		1.481 1.507 -1.7				1.593 1.596 -0.2
J								
K	1.488 1.479 +0.6				1.531 1.517 +0.9			
L								
M				1.424 1.424 +0.0				1.500 1.508 -0.5
N								
O								
P	1.158 1.163 -0.4					1.322 1.330 -0.6	1.338 1.346 -0.6	1.327 1.355 -2.0
Q								
R								
R								
S								
T			EAU			EAU		
U								
V					EAU		0.904 0.877 +3.0	
W			EAU				0.800 0.786 +1.8	
X							0.741 0.713 +3.9	
Y							0.808 0.828 -2.4	

W 28	X 27	Y 26
0.419 0.388 +8.0	0.347 0.320 +8.0	0.382 0.421 -9.0

CONFIGURATION DE REFERENCE - CALCUL DOT

. un effet de spectre : les paramètres neutroniques sont condensés en énergie sur un spectre de cellule en milieu infini, ce qui va être une cause non négligeable d'erreurs.

Ces deux effets existent aussi au niveau du calcul de diffusion, mais ils doivent être en partie compensés par la mauvaise détermination des courants à l'interface coeur-réflecteur ; ce qui globalement pour ces cellules nous donne des écarts un peu moins importants que lors d'un calcul de transport qui restitue correctement ces courants.

2.2 Configuration avec poisons sans intéraction

Il s'agit de la configuration N° 341 pour laquelle nous avons quatre crayons d'UO_2-Gd_2O_3 dans le coeur.

Nous rappelons que le titre critique en bore est de 2052 ppm.
La valeur propre obtenue avec le code Dot est de 1,01446.

L'écart avec la valeur propre de référence (1 pcm) n'est pas significatif.
L'efficacité des crayons gadoliniés est donc bien calculée.

La distribution de puissance est portée dans le tableau ci-après. Les écarts obtenus sont à l'intérieur des fourchettes d'incertitudes expérimentales, en particulier autour et dans le crayon empoisonné.

Le calcul de la distribution de puissance est donc tout à fait satisfaisant.

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.530 1.533 -0.02
J							1.489 1.474 +1.0	
K						0.490 0.488 +0.4	1.407 1.415 -0.6	
L								
M								
N								
O								
P	1.161 1.179 -1.5				1.291 1.314 -1.7			

CONFIGURATION N°341-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
CALCUL TRANSPORT

III ANALYSE DES RESULTATS

Les écarts obtenus sur l'efficacité de l'absorbant gadolinié avec les calculs de diffusion, sont comme le montre cette étude, supprimés avec le traitement des deux configurations par un calcul de transport.

Pour en analyser les raisons, nous allons comparer les résultats des calculs de diffusion et de transport pour les deux configurations (référence et N° 341).

Dans le tableau ci-dessous, nous portons :
la valeur propre (keff)
le facteur de multiplication infini de la zone combustible ($\overline{k}_\infty$)
le taux de fuite.

		Configuration de référence	Configuration N° 341	Δ
Calcul de diffusion (Diane)	$\overline{k}_{inf}$	1.26592	1.26924	262 pcm
	keff	1.00566	1.00480	86 pcm
	Fuite	23016 pcm	23363 pcm	347 pcm
Calcul de transport (Dot)	$\overline{k}$inf	1.26619	1.26958	266 pcm
	keff	1.01445	1.01446	1 pcm
	Fuite	22167 pcm	22433 pcm	266 pcm

Nous remarquons tout d'abord, que le taux de fuite varie entre les deux configurations. Il est plus important pour la configuration N° 341. En effet l'introduction de poison dans la zone centrale du coeur modifie la distribution macroscopique du flux, le maximum étant déporté vers une zone plus proche du réflecteur, d'où une augmentation des fuites.

L'expérience consistant à remplacer des crayons combustible par des absorbants en recherchant un titre en bore critique ne constitue pas une stricte équivalence poison-bore comme on a coutume de l'appeler.

Il est clair à la vue du tableau précédent que l'absorption du gadolinium ne compense qu'une partie de la réactivité introduite par dilution du bore soluble.

En effet près de 30 % de cette réactivité correspond à une augmentation des fuites radiales par effet de redistribution. Or nous savons que le taux de fuite radial est mal calculé en théorie de la diffusion.

L'erreur faite sur celui-ci ne sera pas toujours la même selon les configurations comme le montre le tableau ci-dessus.

En théorie du transport nous calculons une augmentation des fuites, entre les deux chargements de 266 pcm ; alors qu'elle est en théorie de la diffusion de 347 pcm, soit une différence de 81 pcm.

La dérive de valeur propre obtenue à la suite des calculs de diffusion (86 pcm) correspond à peu de choses près à l'erreur commise sur le taux de fuite (81 pcm).

Si l'on rapproche cela des résultats obtenus sur les termes $\overline{k}_{\infty}$, il devient clair que l'absorption du gadolinium proprement dite est bien restituée par les deux calculs.

Seul l'effet de fuite est mal pris en compte par les calculs de diffusion, comme on le voit puisque l'erreur sur la variation du taux de fuite entre les deux configurations représente 30 % (81/266) de cette dernière.

CONCLUSION DU CHAPITRE

L'étude faisant l'objet de ce chapitre, nous a permis d'aborder le traitement d'absorbants gadoliniés sous forme d'Alumine ou d'oxyde mixte.

Nous avons d'abord considéré un coeur à plaques, d'une géométrie volontairement simple et propre. Ainsi l'utilisation de module de calcul de transport à une dimension, nous a permis en affinant la méthode de calcul de projet de faire disparaître les légers écarts obtenus lors de la 1ère interprétation [6], au prix d'une augmentation des coûts.

On a vu que les distributions de puissance étaient correctement restituées.

L'efficacité des plaques d'Alumine gadolinié est déterminée avec une précision compatible avec les incertitudes expérimentales (qui sont ici d'environ $\pm$ 1 %).

En parallèle à cette étude, l'interprétation d'expériences sur un coeur à crayons a entraîné l'utilisation de modules de calcul plus complexes, à deux dimensions (multicellule).

L'utilisation du schéma de calcul classique (transport-diffusion) a montré que les effets liés à la présence de crayon d'UO_2-Gd_2O_3 sont correctement pris en compte. L'amélioration de la distribution de puissance, dans et autour des crayons empoisonnés, allant de pair avec une plus grande sophistication des options de calcul multicellule indique clairement que l'emploi de l'option multicellule standard (Roth) est à écarter pour les cas traités ici.

La dérive sur la valeur propre des différentes configurations pour cette interprétation n'étant quant à elle pas à mettre directement sur le compte d'une mauvaise estimation de l'absorption dans le Gadolinium, ceci a été mis en évidence avec l'interprétation par un calcul de transport des configurations N° 340 (référence) et 341.

Les écarts obtenus au niveau du calcul global du coeur sont dus à des erreurs commises sur la détermination des taux de fuites par un calcul de diffusion. Ces erreurs sont d'autant plus importantes que le coeur sera de taille réduite, et peuvent induire des écarts importants sur les effets différentiels entre plusieurs configurations.

En ce qui concerne les données de base des isotopes du gadolinium, on voit qu'avec de tels essais, effectués avec des coeurs en début de vie pour des charges en gadolinium comparables à celles succeptibles d'être rencontrées dans les futurs réacteurs, il est impossible d'obtenir des informations de grande précision, puisque les absorbants se comportent pratiquement comme des corps noirs.

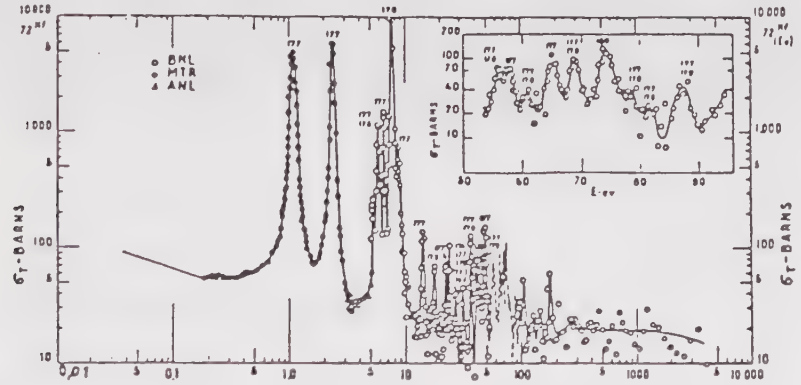
CHAPITRE III

INTERPRETATION D'EXPERIENCES RELATIVES A DES ABSORBANTS HAFNIES

INTRODUCTION

Le Hafnium est aujourd'hui un des corps les plus utilisés comme matériau absorbeur de neutron pour les réacteurs de petite taille.

Une possibilité consiste à utiliser un poison consommable combinant Bore et Hafnium. Le premier agit dans le domaine thermique, essentiellement suivant une loi en 1/v ; le second couvre les domaines thermique et épithermique du fait des résonances très importantes de l'un de ses isotopes (le ^{177}Hf) comme le montre la figure ci-dessous.



— Variations de la section efficace de capture du hafnium pour des neutrons d'énergies comprises entre 0.025 eV (thermiques) et 10 000 eV.

Le poison hafnié peut être dilué dans le gainage des plaques. Il est également employé pour les croix de contrôle des réseaux à plaques compte tenu de ses propriétés, notamment :

. une grande résistance à la corrosion dans l'eau chaude et la vapeur d'eau (cette corrosion a pour effet la formation d'une couche d'oxyde protectrice HfO_2 imperméable qui limite le taux de corrosion). Ainsi le hafnium n'aura pas besoin d'être gainé, ce qui sera très avantageux étant donné l'épaisseur des lames d'eau entre faisceaux des réacteurs à plaques.
. une activation négligeable au cours de l'irradiation.
. de très bonnes caractéristiques mécaniques (mais lié au degré de pureté du métal).
. une grande section efficace de capture des neutrons.

On voit donc que le hafnium sera un élément de choix pour le contrôle des réacteurs nucléaires à eau légère.

Il n'est cependant pas employé dans les P.W.R., les raisons principales en sont :

. Le prix élevé dû notamment au haut degré de pureté que l'on doit obtenir, et à la grande réactivité du métal qui font que les risques de contamination chimiques sont grands ce qui entraîne de nombreuses précautions lors de sa fabrication.

. La forte densité du hafinium, fait qu'une barre de contrôle de P.W.R. aurait un poids très important ce qui ne serait pas sans poser de gros problèmes de tenues et d'amortissement lors des chutes de barres.

Le problème de la qualification de cet absorbeur se pose donc essentiellement pour les réseaux de réacteurs à plaques. Pour cela, nous avons dans le cadre de cette thèse préparé et proposé un programme expérimental nous permettant d'aborder progressivement les différents aspects de la qualification du hafinium. Des essais ont donc été réalisé à AZUR (Cadarache) sur des configurations assimilables à une dimension.

Des expériences ayant eut lieu dans le passé sur des coeurs à crayons (voir chapitre II "CAP 1800"), avec l'introduction de crayon de hafnium, nous les avons interprétées en parallèle. Ainsi comme nous l'avons vu pour le gadolinium dans le chapitre II, nous pourrons grâce à l'étude de deux réseaux de types différents tirer des conclusions plus générales.

QUELQUES PROPRIETES PHYSIQUES

Le hafnium est un corps qui a six isotopes stables dont les nombres de Masse sont : 174, 176, 177, 178, 179, 180.
On sait que le hafnium a une section efficace d'absorption des neutrons importante. L'étude de l'absorption des neutrons d'énergie comprise entre 1eV et 10000 eV révèle l'existence de sept résonances caractéristiques principales qui sont portés dans le tableau suivant :

Energie des neutrons en eV	Isotope	Valeur maximum de σ_a en barns
1,1 ± 0,002	^{177}Hf	4950
2,38 ± 0,01	^{177}Hf	5800
5,69 ± 0,05	^{179}Hf	1400
5,90 ± 0,01	^{177}Hf	1100
6,6 ± 0,1	^{177}Hf	7200
7,8 ± 0,1	^{178}Hf	9700
8,8 ± 0,1	^{177}Hf	7400
13,7 ± 0,2	^{177}Hf	130

[17] - Principales résonances d'absorption des neutrons par le Hafnium.

Si on observe la figure du paragraphe précédent, on remarque sept résonances avec des valeurs maximales de σ_a de l'ordre des milliers de barns entre 1eV et 10eV ; de 10 à 110eV on peut observer environ une trentaine de résonances dont les valeurs maximales de σ_a se situent entre 40 et 130 barns.
Cinq sur sept des résonances principales de la section efficace d'absorption des neutrons sont à attribuer au ^{177}HF.

Pour les neutrons thermiques, dont l'énergie est de 0,025 eV, la section efficace d'absorption du Hafnium est de 105 barns. Le tableau suivant montre la contribution de chaque isotope.

Intégrale de résonance (barns)	Isotope	Proportion isotopique	Section efficace en barns (à 0,025 eV)	Contribution dans HF naturel
465	^{174}Hf	0,18 %	390 ± 55	2,7 ± 1,8
700	^{176}Hf	5,22 %	38 ± 6	0,8 ± 0,8
7260	^{177}Hf	18,47 %	365 ± 20	70,2 ± 5,5
1950	^{178}Hf	27,13 %	86 ± 7	20,3 ± 2,7
600	^{179}Hf	13,78 %	45 ± 5	9,0 ± 2,1
43	^{180}Hf	35,20 %	13 ± 1	4,9 ± 1,8

[19] - Contribution des différents isotopes du HF.

La section efficace d'absorption des neutrons rapides entre 0,05 MeV et 3 MeV décroît de 10 barns à 7 barns [17].

Le hafnium possède de nombreux isotopes radioactifs, nous ne nous interesserons qu'à ceux produits par capture d'un neutron. Dans le tableau suivant nous donnons les principales caractéristiques connues [17] de ces isotopes.

Isotope	Période de décroissance	Mode de désintégration	Réaction de formation
$^{179}_{72}Hf^*$	19 sec $\pm$ 0,5 sec	Transition isomérique nucléaire γ - 0,16 et 0,22MeV	$^{178}_{72}Hf\ (n, \gamma)\ ^{179}_{72}Hf^*$
$^{180}_{72}Hf^*$	5,5 h	Transition isomérique nucléaire γ - 0,057 à 0,44 MeV	$^{179}_{72}Hf\ (n, \gamma)\ ^{180}_{72}Hf^*$
$^{181}_{72}Hf^*$	46 $\pm$ 1 jour	β^- 0,42 $\pm$ 0,01 MeV γ 0,13 à 0,61 MeV	$^{180}_{72}Hf\ (n, \gamma)\ ^{181}_{72}Hf^*$
$^{183}_{72}Hf^*$	64 mn	β^- 1,4 MeV γ 1,75 MeV	$^{182}_{72}Hf\ (n, \gamma)\ ^{183}_{72}Hf$

[17] - Isotopes radioactifs du hafnium (par capture d'un neutron).

Une des principales caractéristiques du hafnium comme absorbeur de neutrons est la faible diminution de sa section efficace d'absorption malgré le changement de la composition isotopique provoqué par les réactions nucléaires pendant l'irradiation qui sont les suivantes :

$$^{177}_{72}Hf + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{178}_{72}Hf + \gamma$$

$$^{178}_{72}Hf + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{179}_{72}Hf^* + \gamma \longrightarrow {}^{179}_{72}Hf^* \xrightarrow{19s} {}^{179}_{72}Hf + \gamma$$

$$^{179}_{72}Hf + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{180}_{72}Hf^* + \gamma \longrightarrow {}^{180}_{72}Hf^* \xrightarrow{5,5h} {}^{180}_{72}Hf + \gamma$$

Dans le tableau suivant nous montrons les variations de la composition isotopique pour deux flux intégrés de neutrons (5.10^{20} et 5.10^{21} neutrons).

Isotopes	nombre d'atomes détruits / nombre d'atomes initiaux		nombre d'atomes après irradiation (*) / nombre d'atomes avant irradiation	
	5.10^{20}	5.10^{21}	5.10^{20}	5.10^{21}
^{177}Hf	0.087	0.166	0.913	0.834
^{178}Hf	0.015	0.031	1.04	1.08
^{179}Hf	0.015	0.030	1.01	1.03
^{180}Hf	0.002	0.004	1.01	1.01
(*) En tenant compte des atomes créés par l'irradiation.				

On voit à l'aide de ce tableau que pour un flux intégré de 10^{21} neutrons, soit une année d'irradiation dans un flux de 3.10^{13} n/cm^2/sec, la modification de la composition isotopique ne diminue pas la section efficace d'absorption totale (à 0,025eV) des neutrons de plus de 5 %.

En conclusion, nous dirons, que les deux aspects essentiels du hafnium sont :

. une efficacité qui décroît très peu dans le temps, pour du hafnium pur.

. une absorption des neutrons thermiques et épithermiques avec une grande efficacité par suite des phénomènes de résonance dans le domaine d'énergie de 1 à 100eV.

A - INTERPRETATION DES EXPERIENCES "AZUR-CARAMEL II" RELATIVES AUX LATTES DE HAFNIUM

En Février et Mars 1982, une série d'expériences concernant des configurations avec des absorbants sous forme de Hafnium s'est déroulée dans la pile AZUR [20]. Cela à la suite du programme expérimental que nous avions proposé, et qui devait nous permettre de qualifier notre schéma de calcul pour des absorbants sous différentes formes [21]. Mais compte tenu des impératifs de temps liés à la disponibilité des installations expérimentales, le programme préparé a été amputé de nombreuses configurations. Les essais se sont donc limités à des absorbants en Hafnium pur, sous forme de rideau de différentes épaisseurs, pleins et avec lame d'eau interne, et à différentes côtes d'enfoncement dans le coeur.

I PRESENTATION DES ESSAIS

1.1 Description du coeur

Il s'agit du coeur à plaques décrit au chapitre précédent qui a fait l'objet d'une première campagne d'expériences. Il a été repris ici pour étudier les différentes configurations réalisées en remplaçant les plaques combustibles de la rangée centrale du coeur de référence par un certain nombre de lattes de hafnium assemblées pour former un rideau.

1.2 Géométrie des plaques

Nous ne reviendrons pas sur la géométrie des plaques combustibles qui ont été décrites en détail dans le chapitre précédent.

Les rideaux de Hafnium sont constitués par un empilement de lattes de Hafnium d'épaisseur théorique 0,7 mm. On peut constituer ainsi des rideaux de plusieurs épaisseurs, à savoir : 0,7 mm ; 1,4 mm ; 2,8 mm

Les rideaux seront constitués en mettant plusieurs lattes côte à côte (les lattes ont une largeur de 68 mm). Afin d'assurer la tenue mécanique et l'étanchéité, l'ensemble est gainé par 2 plaques d'aluminium d'épaisseur 0,5 mm.

Un chargement a été fait en vue de simuler une croix creuse. Pour cela la rangée combustible centrale est remplacée par un assemblage composé de deux épaisseurs de hafnium gainé alu avec une lame d'eau centrale entre ces deux épaisseurs. Cette lame d'eau centrale a une épaisseur de 2,2 mm.

Nous utiliserons également un rideau de Hafnium de 5 mm d'épaisseur qui est constitué par une plaque pleine de Hafnium. Ce rideau sera également gainé par de l'aluminium.

1.3 Configurations étudiées

Les configurations seront constituées avec les rideaux de différentes épaisseurs :

Epaisseur du rideau (mm)	0,7	1,4	2,8	Lame d'eau interne
Configuration	401-08	401-07	401-05	401-06

Avec le rideau de Hafnium de 5 mm d'épaisseur plusieurs configurations ont été réalisées en fonction de sa côte d'enfoncement dans le coeur.

Si l'on appelle H la hauteur des plaques combustibles, le rideau de hafnium a été enfoncé aux côtes suivantes (côtes par rapport au bas du combustible)
0 H/4 H/2

1.4 Mesures effectuées

Les essais interprétés sont faits à 20°C et des mesures radiales dans le plan médian ainsi que des mesures axiales ont été effectuées.

1.4.1 Les différentes mesures

Il a été généralement mesuré :

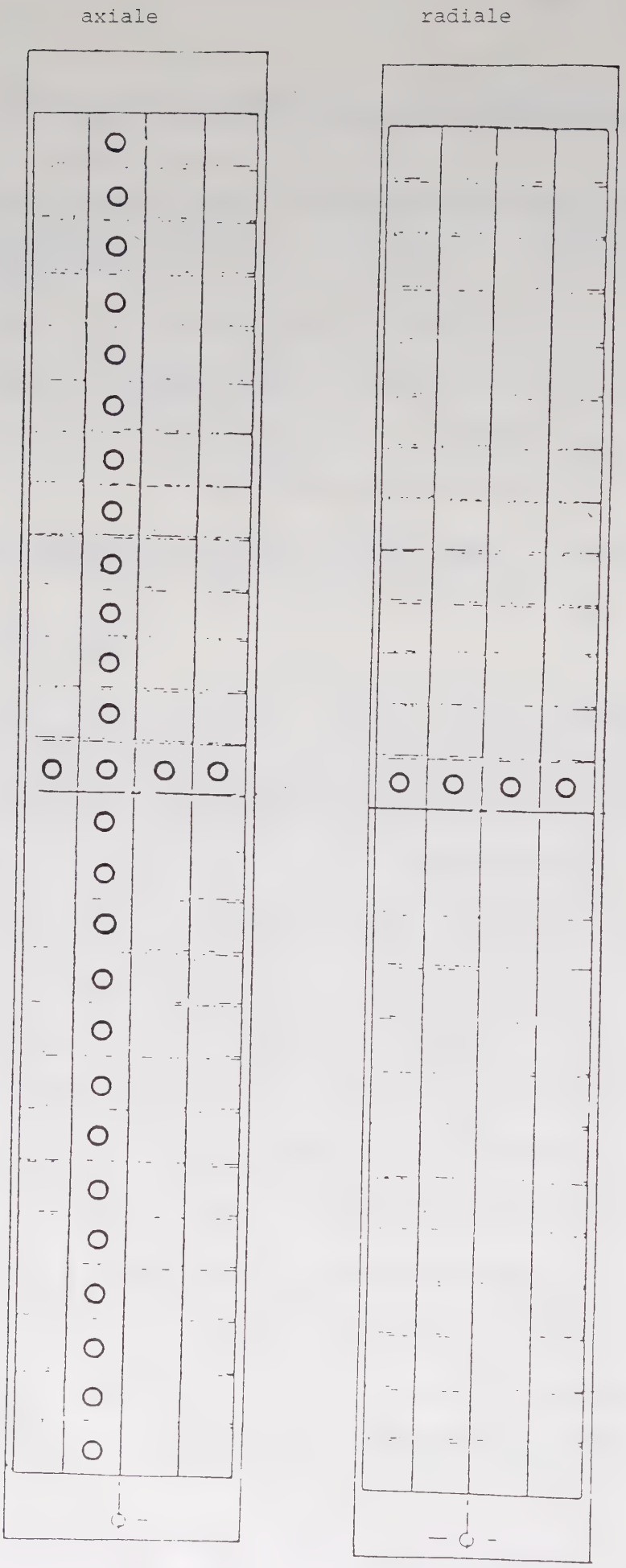
. Le titre critique en bore soluble par dosage chimique.

. Des distributions de puissance sur les caramels de certaines plaques par comparaison de leur activité γ après irradiations. Ces distributions ont été faites radialement et axialement comme le montre la figure suivante où sont indiqués les caramels sur lesquels portent les mesures.

1.4.2 Les incertitudes expérimentales

Les configurations sont étudiées en relatif par rapport à la configuration de référence, la précision sur le titre en bore sera de l'ordre de quelques ppm (cf Annexe A).

Les mesures de répartition de puissance sont connues à $\pm$ 2% de manière globale, de nombreux points de mesure pouvant être entachés d'une incertitude plus grande compte tenu des problèmes de tenue de ce coeur.



Points de mesure pour distribution de puissance

II METHODE DE CALCUL

Le schéma de calcul est en tout point similaire a celui décrit au A du Chapitre II. Le traitement de l'absorbant dans son environnement se fera selon la formule retenue dans le Chapitre II. Lors de notre étude nous avons dû effectuer des calculs de coeur à trois dimensions. Pour cela le code Icare a été utilisé. Nous présentons donc rapidement ce code.

2.1 Code Icare

Le calcul détaillé de la distribution de puissance d'un réacteur nécessite l'utilisation de l'équation de la diffusion à trois dimensions, dont la résolution au moyen de la méthode des différences finies sur un maillage fin est extrêmement coûteuse.

Parmi les méthodes qui tendent à réduire le coût nécessaire à la résolution de ce problème, figure la méthode de synthèse monocale continue, qui est employée par le code Icare.

Cette méthode consiste à développer le flux à trois dimensions sur une base tronquée de fonctions qui sont des solutions de l'équation de la diffusion à deux dimensions. Ces fonctions de base sont généralement appelées "fonctions d'essai".

A trois dimensions, nous avons :

$$\phi\ (x, y, z) = \sum_{k=i}^{k} \varphi_k\ (x, y)\ Z_k\ (z)$$

Pour les fonctions d'essai $\varphi_k\ (x, y)$, nous prenons les solutions de l'équation de la diffusion à deux dimensions pour chacune des régions se superposant dans le coeur (y compris pour les réflecteurs supérieurs et inférieurs). Les solutions ne tiennent pas compte des autres régions du réacteur, lequel est considéré pour leur calcul, comme axialement infini et homogène. Le couplage sera fait, ensuite par des "fonctions de mélange".

Les fonctions $Z_k\ (z)$, appelées "fonctions de mélange", seront déterminées par la méthode dite "des résidus pondérés". On réduit ainsi un très coûteux calcul à trois dimensions à un ensemble de calculs à deux et une dimensions, demandant pour la résolution du problème, beaucoup moins d'encombrement et de temps machine.

2.2 Bibliothèque utilisée

Pour le combustible nous avons la même bibliothèque que lors de l'étude du chapitre précédent. Pour le Hafnium nous avons utilisé l'isotope hafnium naturel (numéro Appolib 280) autoprotégé (numéro del'isotope effectif 1280).

2.3 Normalisation des résultats de distribution de puissance

Les résultats sont normalisés de telle sorte que les sommes des valeurs expérimentales et calculées soient égales.

III CALCULS PRELIMINAIRES

Préalablement aux essais nous avons dû effectuer plusieurs calculs pour déterminer certains paramètres dont la connaissance est nécessaire pour constituer le dossier de sûreté.

3.1 Efficacité des absorbants de sécurité (A.S.)

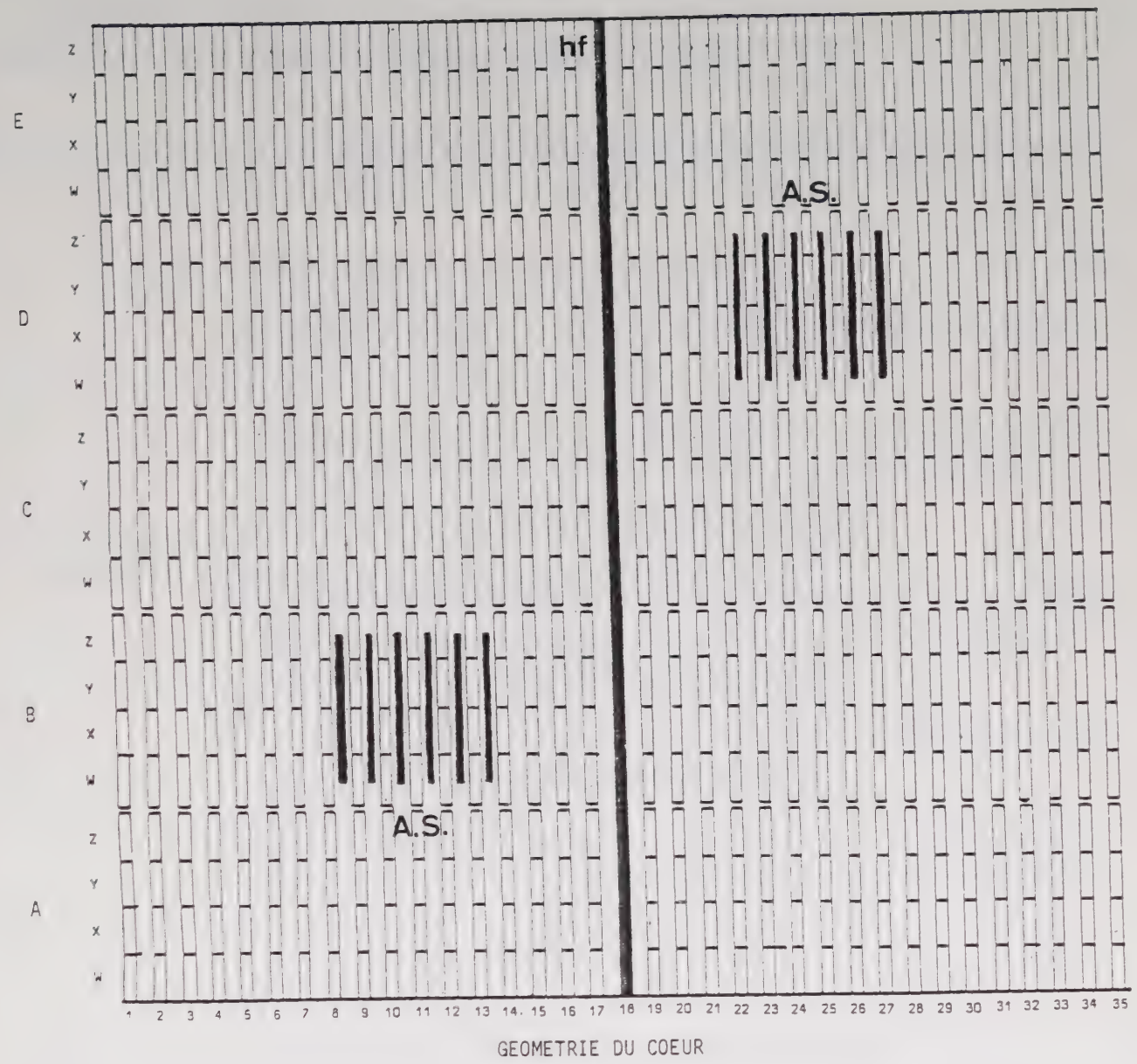
Ces absorbants de sécurité sont constitués par 6 lattes de cadmium, de 68 mm de long et de 1 mm d'épaisseur qui sont gainées d'1 mm d'Inox. Ces lattes sont situées entre les plaques combustibles et centrées sur celle-ci (figure ci-dessous).

Les absorbants de sécurité sont au nombre de deux (AS1 et AS2). L'efficacité des ces absorbants a été déterminée lors de la première campagne d'essai sur la configuration de référence.

Cette efficacité va être modifiée avec l'introduction des rideaux de hafnium compte tenu de la nouvelle distribution de flux macroscopique dans le coeur.

Nous devons connaître pour des raisons de sécurité l'efficacité des absorbants de sécurité lorsque les rideaux de hafnium seront introduits dans le coeur.

Nous avons déterminé cette efficacité pour le coeur avec le rideau de hafnium de 5 mm d'épaisseur complètement enfoncé ainsi que pour la configuration de référence pour vérifier notre méthode de calcul.



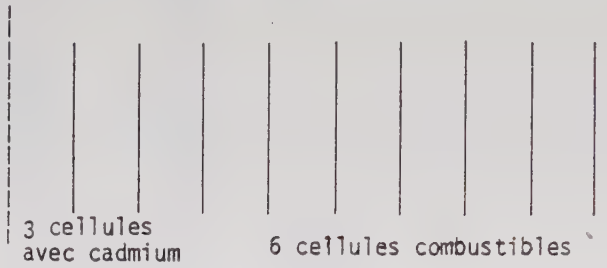
GEOMETRIE DU COEUR

3.1.1 Méthode calcul

La méthode de calcul utilisée consiste, pour chacune des deux configurations, à effectuer un calcul du coeur sans absorbant, puis un calcul de coeur avec les deux grappes d'A.S. complètement enfoncés, de la comparaison de ces deux calculs on déduit leur efficacité globale.

Si le calcul de coeur sans A.S. ne pose pas de problème, les configurations avec ceux-ci enfoncés nécessitent des calculs de transport permettant de prendre en compte correctement le gradient de flux au niveau des absorbants en cadmium.

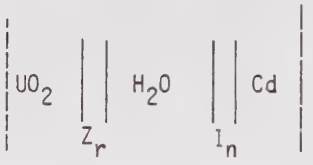
Nous avons donc effectué pour chacun des deux cas, le calcul traverse transport sur la géométrie suivante :



Pour des raisons de coût, nous avons diminué le nombre de points de calcul en considérant chacune des cellules comme un milieu homogène. Les sections efficaces de chacun de ces milieux homogènes étant issues :

. pour les cellules combustibles
d'un calcul Apollo sur une cellule combustible en milieu ∞

. pour les cellules avec cadmium
d'un calcul Apollo plan traitant la géométrie suivante :



Le nombre de points de calcul dans le cadmium est de 1 point pour 0,5 mm. Nous avons fait un calcul avec 3 points pour 0,5 mm sans qu'il y ait de répercussion notable au niveau de la valeur propre du coeur. Tous nos calculs seront donc faits avec 1 point de calcul pour 0,5 mm de Cd.

L'équivalence entre transport et diffusion est assurée par le code Equipage.
Les calculs ont été faits aux titres en bore suivants :
1249 ppm pour le coeur de référence
550 ppm pour le coeur avec un rideau de Hf.

3.1.2 Résultats

a) Coeur de référence (35 rangées de 5 plaques)

Lors de la première campagne d'expériences avec ce coeur, une mesure d'efficacité des A.S. avait été effectuée par chute de barre et mesurée au réactimètre.

Nous disposons donc d'une valeur expérimentale de l'efficacité des absorbants de sécurité enfoncés jusqu'à environ 60 mm du bas combustible.
L'efficacité portée sur le cahier de bord de la pile AZUR est de 5000 pcm.
Cette valeur est connue à $\pm$ 10 % [22].

Nous avons repris le calcul du coeur de référence pour savoir si la méthode de calcul décrite dans le paragraphe précédent nous permet de déterminer de manière correcte l'efficacité des grappes d'absorbants.

Les résultats obtenus sont les suivants :
La valeur propre du coeur sans A.S. est de : 1,00594 ; celle du coeur avec des A.S., complètement enfoncés, est de 0,95154 ; d'où une efficacité de 5560 pcm.

La valeur expérimentale dont nous disposons est donnée lorsque ceux-ci sont enfoncés jusqu'à 60 mm du bas combustible.
Nous avons dû déterminer ce que représente l'efficacité de ces 60 mm par rapport à l'efficacité totale.
Pour cela on a fait des calculs à 3 dimensions à l'aide du code ICARE.

Les trois calculs suivants ont été effectués :
- A.S. hors du coeur (1)
- A.S. complètement enfoncés (2)
- A.S. enfoncé jusqu'à 60 mm du bas du combustible (3)

Nous obtenons à 1249 ppm avec le calcul de synthèse les valeurs propres suivantes :
λ (1) = 1,00550
λ (2) = 0,95090
λ (3) = 0,95200

d'où les efficacités
E (A.S. complet) = 5583 pcm
E (A.S. à 60 mm) = 5468 pcm.

L'efficacité des 60 derniers mm représente donc environ 2 % de l'efficacité totale des A.S.

(Remarque : Nous voyons que le calcul de synthèse pour le coeur sans A.S. nous redonne la valeur propre que nous obtenions avec le calcul diffusion 2D. Ce qui montre que le laplacien axial a été correctement déterminé).

Nous avons vu que l'efficacité des absorbants complètement enfoncés est de 5560 pcm, ce qui nous donne lorsqu'ils sont enfoncés jusqu'à 60 mm du bas combustible une efficacité de 5450 pcm.

Nous obtenons donc une valeur en accord avec l'efficacité mesurée qui est de 5000 pcm $\pm$ 10 %.

Les résultats montrent que le schéma de calcul proposé permet de déterminer de manière satisfaisante l'efficacité d'absorbants de sécurité en cadmium.

Pour l'autre configuration envisagée nous avons obtenu les résultats suivants :

b) Coeur avec rideau de hafnium

La valeur propre du coeur sans A.S. est 1,00828 ; celle du coeur avec A.S. est 0,94790 ; soit une efficacité pour des A.S. complètement enfoncés de 6170 pcm.

Nous voyons que pour cette configuration l'efficacité est un peu plus grande que pour le coeur de référence.

L'introduction du rideau de hafnium dans la rangée centrale du coeur va creuser le flux, le maximum de ce dernier étant alors déporté vers l'extérieur. Les grappes d'absorbants vont se trouver dans des zones où le flux sera plus important que pour le coeur de référence, d'où une efficacité accrue pour eux.

3.2 Efficacité du rideau de hafnium dans le coeur

Le programme expérimental prévoit l'étude de configurations où le rideau de Hafnium sera à différentes côtes d'enfoncement. Les essais se déroulent de telle manière que la première configuration est celle avec le rideau complètement enfoncé, puis on le relève progressivement jusqu'aux différentes côtes demandées.

Lorsque le rideau remonte, une certaine réactivité va être introduite dans le coeur par unité de temps, celle-ci sera bien sûr fonction de la vitesse de remontée du rideau.

Les conditions de sécurité des installations font que l'on ne peut pas avoir un gain de réactivité supérieur à 25 pcm/sec.

Nous devons donc connaître l'efficacité du rideau de hafnium pendant toute la remontée. La connaissance de l'efficacité intégrale et différentielle (efficacité par mm) du rideau est nécessaire aux expérimentateurs pour déterminer la vitesse de déplacement du rideau.

3.2.1 Méthode de calcul

Pour calculer l'efficacité de ce rideau en fonction de la côte, nous devons effectuer des calculs à trois dimensions. Nous utiliserons pour cela le code Icare.

Le coeur sera découpé en trois tranches :
- le réflecteur
- une tranche combustible avec le rideau de Hf central
- une tranche combustible avec la lame d'eau centrale occupant la place du rideau.

Les différentes compositions constituant la lame d'eau et le rideau de hafnium dans leur environnement sont issues d'un calcul de transport 1D effectué à l'aide du code Apollo. L'équivalence entre le calcul de transport et le calcul de diffusion est assurée par le code Equipage.

Tous les calculs sont effectués pour un titre en bore de 570 ppm, qui correspond au titre critique estimé lorsque le rideau est totalement enfoncé dans le coeur.

3.2.2 Résultats

Nous avons porté sur les tableaux et figures suivants l'efficacité intégrale et l'efficacité différentielle pour différentes cotes d'enfoncement du rideau de Hf.

E : efficacité intégrale

$E_i = |10^5 \log \frac{\lambda o}{\lambda i}|$ exprimé en pcm.

λ_o : valeur propre du coeur, le rideau complètement relevé

λ_i : valeur propre du coeur, le rideau enfoncé à la cote i

L'origine pour la mesure des côtes étant prise au niveau inférieur de la partie active des plaques combustibles.

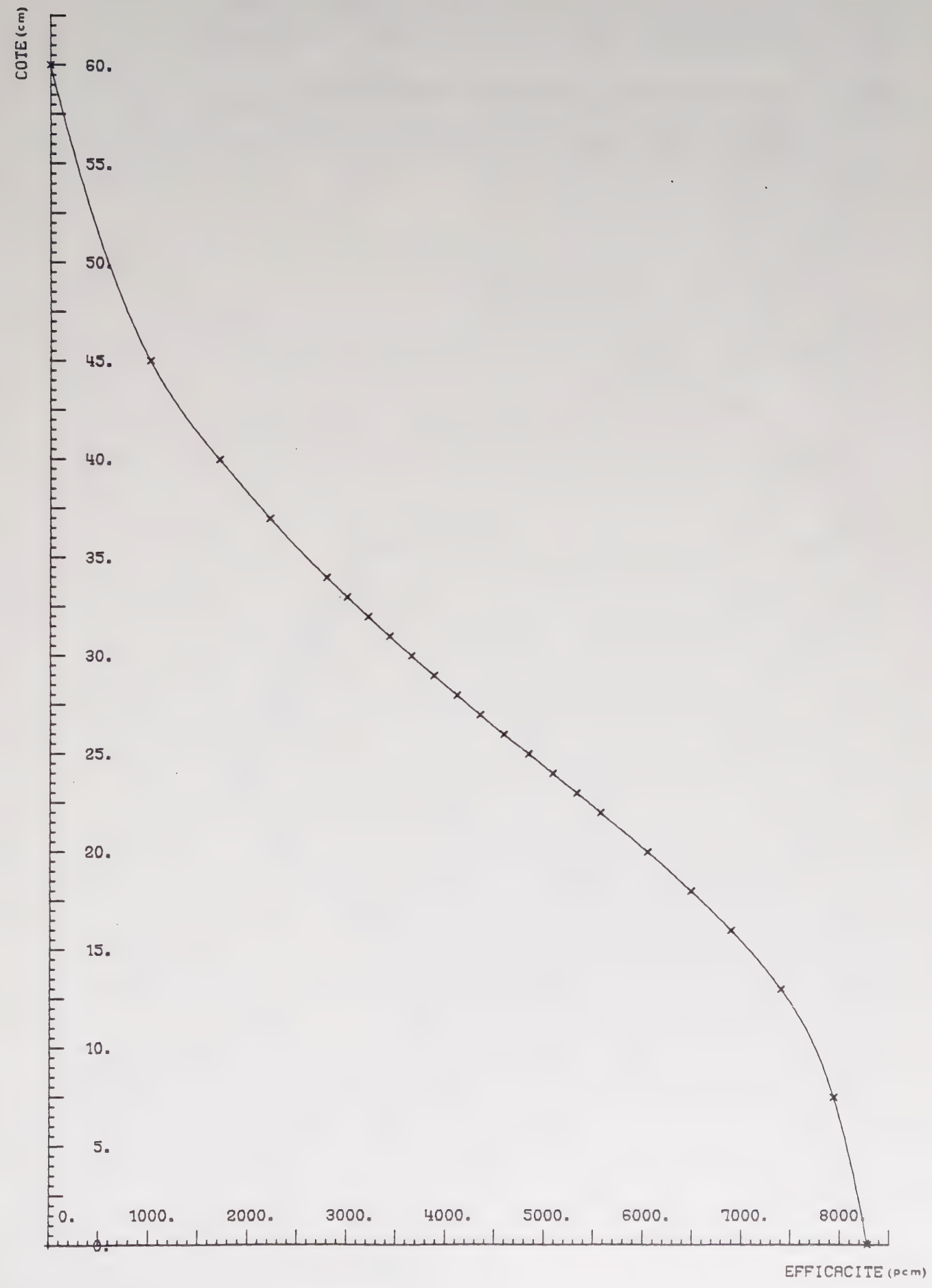
e_i : efficacité différentielle

$$e_i = \frac{\partial E}{\partial z} \simeq \frac{E_{i+1} - E_{i-1}}{2 \Delta z} \text{ exprimé en pcm/mm}$$

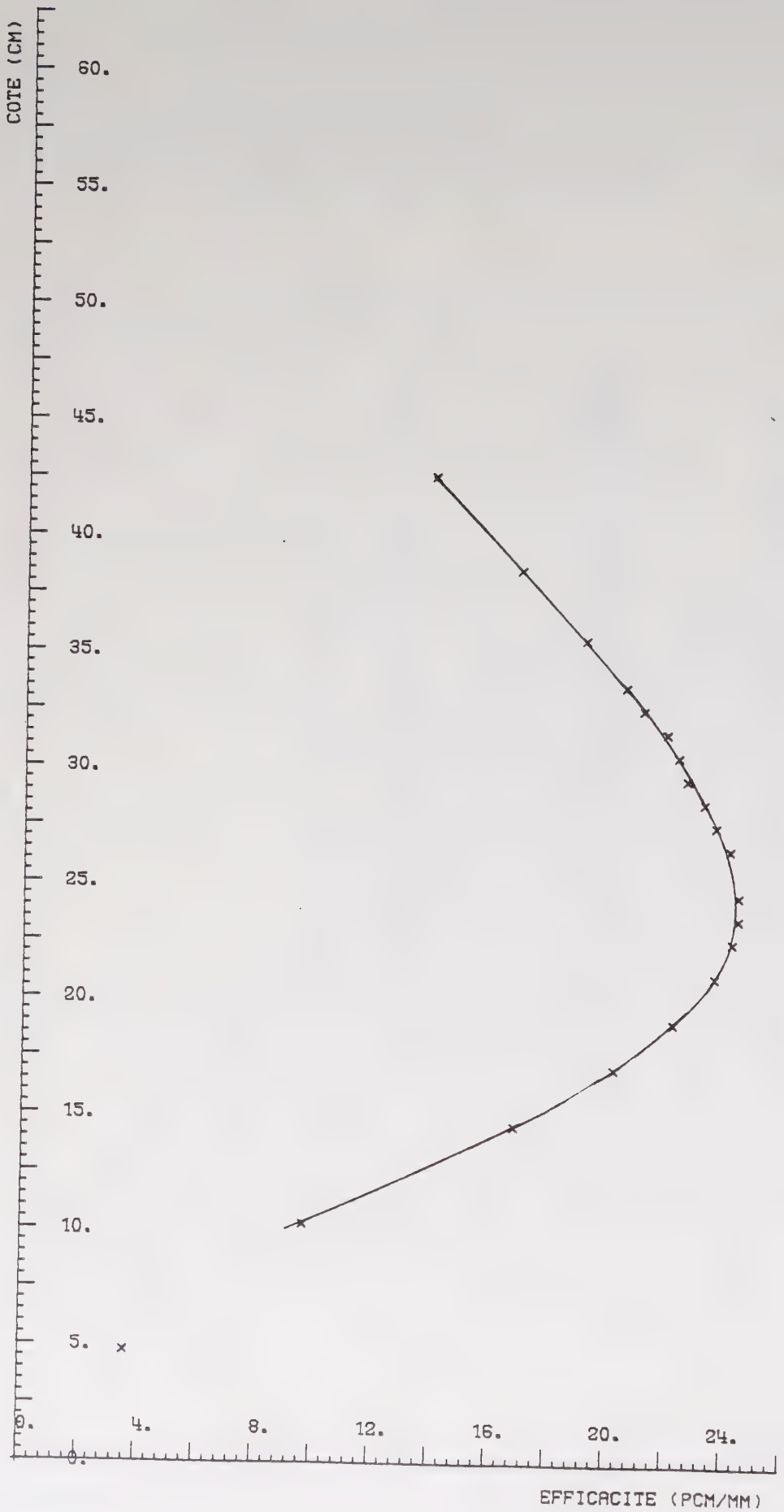
cote (cm)	λ	E (pcm)
60	1.09577	0
45	1.08476	1010
40	1.07720	1709
37	1.07173	2218
34	1.06558	2794
33	1.06339	3000
32	1.06113	3212
31	1.05881	3432
30	1.05643	3656
29	1.05404	3883
28	1.05158	4116
27	1.04909	4353
26	1.04656	4595
25	1.04393	4846
24	1.04138	5091
23	1.03883	5336
22	1.03631	5579
20	1.03141	6053
18	1.02683	6498
16	1.02268	6903
13	1.01751	7410
7,5	1.01210	7943
0,0	1.00866	8283

Nous voyons que l'efficacité différentielle (voir courbe ci-dessous) est maximum vers la cote 25., c'est-à-dire environ 5 cm en dessous du plan médian du coeur ; elle vaut alors de l'ordre de 25 pcm/mm.

EFFICACITE INTEGRALE



EFFICACITE DIFFERENTIELLE



L'efficacité intégrale maximum vaut, lorsque le rideau est complètement enfoncé, et par rapport au coeur avec lame d'eau centrale, environ 8300 pcm.

Les expérimentateurs peuvent ainsi régler la vitesse de remontée du rideau de façon à ce qu'au maximum de l'efficacité différentielle, on reste dans les normes de sécurité, c'est-à-dire à une vitesse inférieure à 1 mm/sec

IV SECTIONS EFFICACES DU HAFNIUM

Nous nous sommes livrés à plusieurs tests concernants les sections efficaces du hafnium.

Nous rappelons que l'isotope utilisé pour nos calculs est équivalent à du hafnium naturel (numéro Apollib 280, associé à l'isotope effectif 1180) (constitué à partir des hafniums ENDF Ribbon matériaux 440-444).

4.1 Variations des sections efficaces

Avec le rideau de hafnium de 5 mm d'épaisseur nous avons calculé l'intégrale effective (I_{eff}) pour deux cas : en autoprotection normale et en dilution infinie.

	Autoprotection normale	Dilution infinie
I_{eff}	50,73 barns	873,62 barns

On a donc ainsi un ordre de grandeur de la variation de l'intégrale effective en fonction de l'autoprotection.

D'autre part nous avons voulu voir la sensibilité de nos résultats à une variation des sections efficaces microscopiques du hafnium. Cette variation a été choisie suffisamment importante pour être supérieure aux incertitudes existant en général sur la connaissance des sections efficaces. Nous avons effectué nos calculs en augmentant ces dernières de 10 %. Cette variation a été effectué séparément dans le domaine des résonances épithermiques (677,29 eV - 2,76 eV) et dans le domaine thermique.

Dans le tableau ci-dessous nous portons les taux d'absorption, par groupe dans le rideau de hafnium pour un neutron absorbé dans le domaine rapide, obtenus à l'issu du calcul de transport sur une traverse.

Groupe	Taux d'absorption section efficace non modifiée	Taux d'absorption section efficace +10% dans le domaine épithermique	Taux d'absorption section efficace +10% dans le domaine thermique
1	.0728	.0728	.0728
2	.9272	.9272	.9272
3	17.4390	17.9011	17.5143
4	12.1736	12.0804	12.3062
Total	30.5126	30.9815	30.8205

Une variation de 10 % des sections efficacesdans le domaine épithermique entraine une augmentation du taux d'absorption dans le groupe 3, par rapport à l'absorption totale, d'environ 1,4 % pour une variation de l'absorption totale de + 1,2 %.

Dans le domaine thermique, une variation de + 10 % des sections efficaces donne une augmentation de l'absorption dans le groupe 4 d'environ 0,4 % par rapport à l'absorption totale qui elle varie de + 0,7 %.

A la suite de ces calculs de transport nous avons fait des calculs de diffusion sur le coeur. Dans le tableau qui suit sont indiqués les résultats obtenus pour des calculs effectués à un titre en bore estimé de 570 ppm.

	Sections efficaces non modifiées	Sections efficaces +10% dans le domaine épithermique	Sections efficaces +10% dans le domaine thermique
Valeur propre du coeur	1,00644	1,00568	1,00596
$\Delta\rho$		- 76 pcm	- 48 pcm
$\frac{\Delta\rho}{e}$		0,8 %	0,5 %

e : efficacité du rideau de hafnium

On peut voir que globalement au niveau du coeur les variations de sections efficaces n'ont pas de répercussion très importante.

En ce qui concerne les distributions de puissance l'effet de ces variations n'est pas décelable.

4.2 Autoprotection des résonances thermiques du hafnium

L'isotope de hafnium naturel (N° 280) autoprotégé permet de prendre en compte, pour un milieu non évoluant, l'autoprotection des résonances de l'ensemble des isotopes, y compris l'effet d'interaction entre résonances d'isotopes différents. Ce traitement ne concerne que le domaine épithermique alors que l'isotope 177 comporte deux importantes résonances thermiques situées à une énergie de 1,098 eV et 2,38 eV (la coupure thermique est à 2,76 eV).

Le maillage habituel en énergie (Apollib 99 groupes) ne permet pas une description suffisamment fine de ces résonances ce qui entraine la nécessité de définir des sections effectives (autoprotégées).

Nous avons tracé, sur les deux figures qui suivent, la valeur de la section efficace d'absorption du hafnium naturel en fonction de l'énergie aux alentours des pics de 1,098 eV et de 2,28 eV situés dans le domaine non autoprotégé par Apollo.

On y a porté, la répartition calculée à partir des paramètres de résonance (B.N.L.), et les valeurs moyennes des sections d'absorption de la bibliothèque Apollib à 99 groupes et à 20°C.

On constate que le pic à 2,38 eV laisse apparaître un net sous découpage énergétique. Mais même pour le pic à 1,098 eV le découpage peut s'avérer insuffisant.

Nous avons donc évalué des sections effectives à ces énergies et pour les conditions géométriques particulières au cas que nous étudions.

Pour cela nous avons utilisé une procédure mise aupoint au C.E.A. [23] et [24] fondée sur le formalisme Breit et Wigner à 1 niveau dans l'hypothèse résonance large.

Nous rappelerons donc brièvement le principe de la méthode, puis les résultats obtenus sur notre cas seront exposés.

4.2.1 Principe de la méthode

Ecrivons tout d'abord la section efficace pour la réaction (n,γ) avec les notations traditionnelles pour une résonance à l'énergie E_o selon la loi de Breit et Wigner à 1 niveau [16].

$$\sigma_j = \pi.\lambda\!\!\!^{-2}.g_j \frac{\Gamma n.\Gamma\gamma}{(E-E_o)^2 + (\Gamma/2)^2} \qquad (1)$$

où : g_j (facteur de spin) $= \frac{2J+1}{2(2I+1)}$ J = spin du noyau composé, I = spin du noyau cible

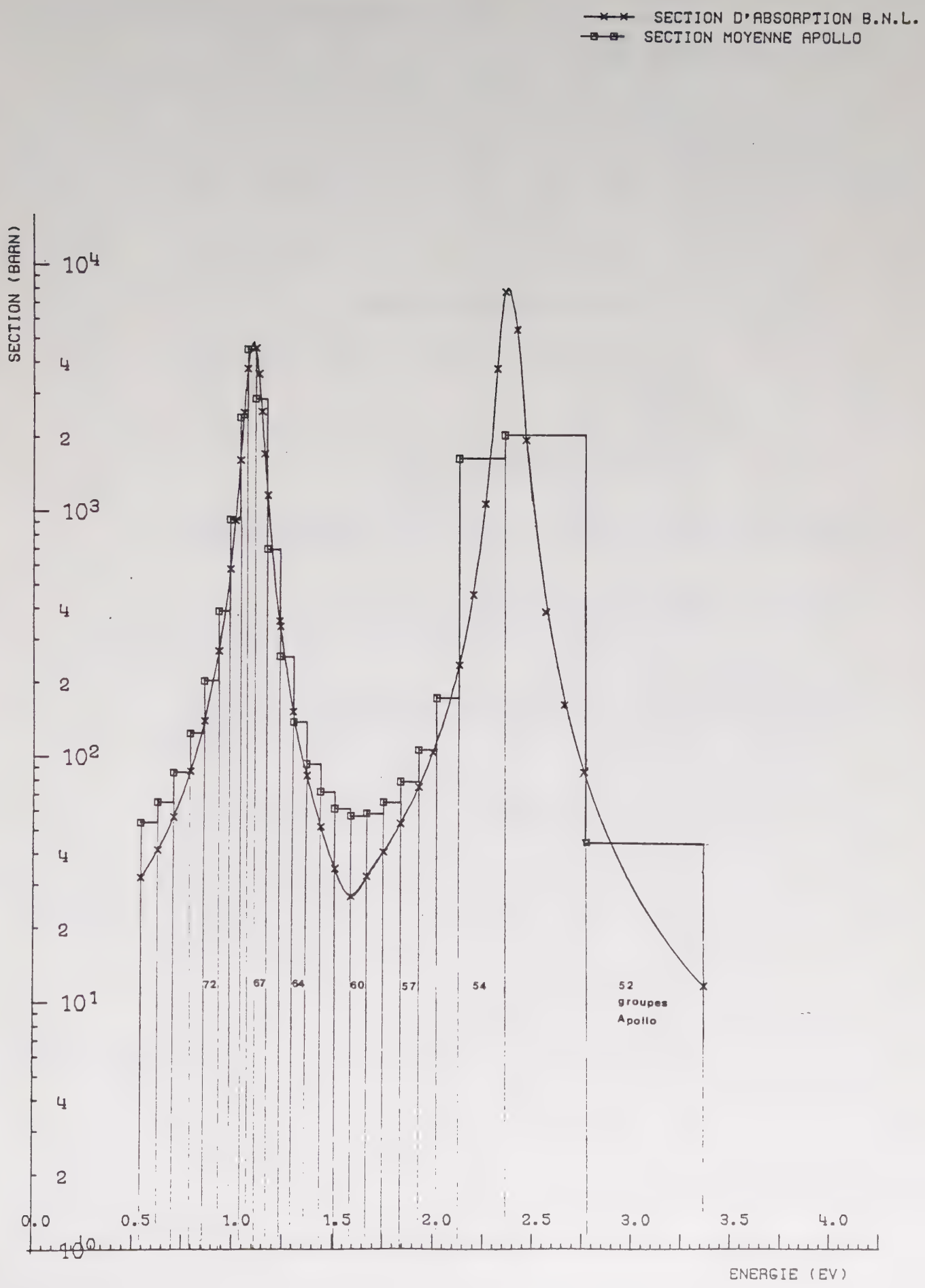
$$\lambda\!\!\!^{-} = \frac{\hbar}{p} \quad \text{et} \quad p = \sqrt{2\mu E}$$

avec μ la masse réduite, et E l'énergie totale du système dans le système du centre de masse (cdm)

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_n} + \frac{1}{mnoyau} \quad \Rightarrow \quad \mu = m_n \times \frac{A}{A+1}$$

Si A est la masse du noyau cible rapportée à celle du neutron (m_n).

HAFNIUM NATUREL - PIC A 1.098 ET 2.38 EV



L'énergie cinétique du neutron incident dans le système du laboratoire s'écrit :

$$E_n = E \cdot \frac{A+1}{A}$$

P s'écrit alors $p = \sqrt{2m_n \cdot E_n} \cdot \frac{A}{A+1}$

d'où $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2\, m_n} \cdot \sqrt{E_n}} \cdot \frac{A+1}{A}$

avec $h = 6.625\ 10^{-27}$ erg.s

$m_n = 1{,}675\ 10^{-24}$ g

$$E\ (ev) = 1{,}602.10^{-12} \times E\ (erg)$$

d'où, si l'on exprime λ^2 en barns :

$$\lambda = \frac{2860}{\sqrt{E}} \times \frac{A+1}{A}$$

En reprenant (1) on a donc :

$$\sigma_\gamma\ (E_n) = \frac{(2860)^2}{4\pi} \cdot \left(\frac{A+1}{A}\right)^2 \cdot \frac{1}{E_n} \cdot g \cdot \frac{\Gamma n \cdot \Gamma\gamma}{(E_n - E_o)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

avec $\Gamma_n\ (E) = \Gamma_n\ (E_o) \cdot \sqrt{\frac{En}{Eo}}$

Si l'on appelle $\sigma_o = \sigma(E_o)$ la valeur au pic de la résonance, on obtient :

et

$$\begin{cases} \sigma_o = (2{,}6036)\ 10^6 \cdot \left(\frac{A+1}{A}\right)^2 \cdot g \cdot \frac{\Gamma n\ (Eo)\ \Gamma\gamma}{Eo \times \Gamma^2\ (Eo)} \\ \\ \sigma_\gamma\ (E_n) = \sigma_o \sqrt{\frac{Eo}{En}}\ \left(\frac{\Gamma\ (Eo)}{\Gamma\ (En)}\right)^2 \cdot \frac{1}{\left(\frac{E-Eo}{\Gamma/2}\right)^2 + 1} \end{cases}$$

A partir des valeurs $\sigma_\gamma\ (E,T)$ ($\sigma_\gamma\ (E)$ à la température T) que l'on peut calculer en discrétisant E aussi finement que l'on veut, on peut calculer une intégrale effective

$$I_{eff}\ (T) = \int \frac{\sigma\ (E,T) \cdot \sigma e}{\sigma\ (E,T) + \sigma e} \times dE$$

En utilisant l'approximation résonance large pour laquelle le flux de structure fine s'écrit :

$$\varphi(E) = \frac{\sigma e}{\sigma(E) + \sigma e}$$

avec σe : section équivalente = $\frac{b}{N_o \overline{T}}$

où b est le facteur de bell,

No la concentration du corps résonnant (10^{24} at/cm^3)

$\overline{T}$ corde moyenne (ici : $\overline{T}$ = 2 x épaisseur de la plaque).

Avec la même approximation, mais pour un groupe Apollo dans lequel on a une section moyenne $\overline{\sigma}$, le code calculerait :

$$\tilde{I} = \frac{\overline{\sigma} \cdot \sigma e \times \Delta u}{\overline{\sigma} + \sigma e}$$

On cherche donc une section effective telle que :

$$\frac{\sigma eff \times \sigma e \times \Delta u}{\sigma eff + \sigma e} = Ieff$$

soit $$\sigma eff = \frac{\sigma e \times i}{1 - i}$$

avec $$i = \frac{Ieff}{\sigma e \times \Delta u}$$

Un programme informatique [23] calcule σ_{eff} (T), et les corrections correspondantes.

Nous l'avons utilisé pour le cas de notre rideau de hafnium d'une épaisseur de 5 mm.

Le hafnium naturel a été utilisé (numéro Apollib : 280) et les sections effectives ont été calculées à l'aide des paramètres de résonance du ^{177}Hf, regroupés ci-dessous :

Masse atomique	A	=	176,9435
N(177) / N(HF Naturel)		=	0,1847 (N : concentration)
Température (°K)		=	293
$\frac{S}{4V.N(177)} = \frac{1}{\overline{e}\, N(177)}$		=	122 barns

E_o(eV) de la résonance	:	1,098	2,38
Spin du noyau cible	:	3,5	3,5
Spin du noyau composé	:	3,0	4,0
2.g. Γ_n(meV)	:	1,92	8,8
Γ_γ (meV)	:	66,0	61,0

Dans le tableau qui suit sont rassemblées les sections effectives par groupe. Ces sections effectives d'absorption (les seules à avoir été modifiées) sont imposées dans le code Apollo par la directive "ajustement" (ITYP = 6).

N° des groupes Apollo	ΔU (eV)	σ_a(Apollo) (barns)	σ_e (barns)	σ_{eff} (barns)
53	0,159427	2064,50	122,0	434,20
54	0,102540	1655,55	122,0	559,65
66	0,05407	704,21	122,0	628,01
67	0,05264	2882,61	122,0	2461,54
68	0,03670	4571,54	122,0	4537,76
69	0,03325	2418,13	122,0	2263,72
70	0,04851	927,69	122,0	850,51

Les intégrales effectives du domaine thermique avant et après correction sont regroupées dans le tableau ci-dessous. (Pour comparaison nous avons porté l'intégrale effective du domaine épithermique).

	Domaine auto-protégé	Domaine thermique			
Energie	677,29 à 2,7679 eV	2,7679 à 2,13 eV		1,235 à 0,986 eV	
		Non corrigé	corrigé	Non corrigé	corrigé
Intégrale effective (barns)	50,73	498,90	126,61	482,99	446,59

La correction des sections d'absorption porte essentiellement sur la résonance situé à 2,38 eV, ce qui pouvait être attendu au vu de son découpage dans la bibliothèque à 99 groupes d'Apollo.

La conséquence de ces corrections a été évaluée sur le calcul de transport, traitant le rideau de hafnium dans son environnement, puis sur le calcul du coeur dans son ensemble.

Nous comparons d'abord les taux d'absorption par groupe dans le rideau de hafnium au niveau du calcul Apollo. (La normalisation est faite à un neutron absorbé dans les groupes 1 et 2).

Groupe	Taux d'absorption (sections non corrigées)	Taux d'absorption (sections corrigées)
1	0.0728	0.0728
2	0.9272	0.9272
3	17.4393	17.3842
4	12.4393	12.1916
Total	30.6129	30.5758

Nous voyons que le taux d'absorption dans le groupe 3 (groupe où se trouve les résonances thermiques) est légèrement moins élevé dans le cas autoprotégé (environ trois pour mille).

Au niveau du calcul de coeur, nous obtenons une valeur propre de 1,00653, soit un écart très faible avec le cas où les sections d'absorption ne sont pas corrigées (le titre en bore est de 570 ppm), la variation de l'efficacité du rideau de hafnium est donc inférieure à un pour mille.

Les distributions de puissance ne sont pas affectées par la correction des sections efficaces.

Nous voyons donc, que dans notre cas, l'autoprotection des résonances thermiques du hafnium n'affecte que très peu nos résultats.

A partir de ces calculs et de ceux du paragraphe précédent, on peut noter la faible sensibilité de nos résultats à une modification de la bibliothèque concernant l'absorbant.

L'influence de l'autoprotection des résonances thermiques du Hf^{177} a également été déterminé pour les rideaux d'épaisseur plus faible que l'on prévoit d'introduire dans le coeur.

Dans les tableaux qui suivent nous avons regroupé les sections effectives par groupe et les répartitions des absorptions dans le hafnium au niveau du calcul de transport, et cela pour les différents rideaux.

N° des groupes	σ_a (Apollo) barns	Rideau 0.7 mm	Rideau 1.4 mm	Rideau 2.8 mm
53	2064,50	530,10	479,20	449,00
54	1655,55	629,95	591,45	570,00
66	704,21	640,61	633,90	630,00
67	2882,61	2484,26	2471,53	2464,76
68	4571,54	4540,87	4539,85	4539,13
69	2418,13	2272,31	2267,60	2265,10
70	927,69	859,98	854,82	851,90

Sections effectives par groupe (barns)

	Taux d'absorption rideau 0.7 mm		Taux d'absorption rideau 1.4 mm		Taux d'absorption rideau 2.8 mm	
Macro-groupe	Sections non cor.	Sections corrigées	Sections non corrig.	Sections corrigées	Sections non corrig.	Sections corrigées
1	0.0768	0.0768	0.0759	0.0759	0.0745	0.0746
2	0.9232	0.9232	0.9241	0.9241	0.9255	0.9254
3	64.4763	63.5288	42.0763	41.8708	26.4180	26.3138
4	64.2718	64.4476	39.8112	39.8663	22.0022	22.0338

(normalisation à 1 neutron absorbé dans le domaine rapide)

On vérifie dans le premier tableau que l'autoprotection augmente avec l'épaisseur du rideau.

L'influence de l'autoprotection des résonances thermiques est d'autant plus grande que l'absorbant est mince.

Comme nous l'avons constaté pour le rideau de 5 mm d'épaisseur, cet effet est relativement peu important sur l'efficacité, bien qu'ici un peu plus sensible. La variation étant de 0.4 % pour le rideau de 0,7 mm.

Avec ces différents tests, nous constatons que nous ne pourrons pas obtenir avec l'interprétation de ces essais des précisions sur les sections efficaces du hafnium. Les rideaux de hafnium se comportent pratiquement comme des corps noirs.

V CONFIGURATION DE REFERENCE

Ces essais se sont déroulés très tardivement (fin des essais en Mars 1982). Les dosages chimique des titres en bore critique ont été faits fin Avril. Nous ne disposons pas des résultats définitifs. Les titres annoncés ici pour toutes nos configurations seront les titres calculés par les expérimentateurs.

La configuration de référence a été réintroduite dans la pile pour déterminer un éventuel recalage du titre en bore par rapport à la première campagne d'essais.

Le titre en bore critique annoncé confirme celui de la première campagne.

Pour la suite de notre étude nous utiliserons donc le calcul de référence présentés au chapitre II.

VI CONFIGURATION AVEC LE RIDEAU DE HAFNIUM DE 5 MM

Lors des différents calculs de transport traitant l'absorbant dans son environnement, il faut découper le rideau de hafnium en plusieurs zones de flux plat pour bien prendre en compte le creusement de flux à l'intérieur de la plaque de hafnium. Nous avons donc effectué quelques tests pour déterminer le nombre de zones nécessaires.

6.1 Maillage spatial dans le rideau de hafnium

Nous comparons des calculs de transport traitant le rideau de hafnium et six cellules combustibles "tampon". Plusieurs calculs ont été effectués en découpant la plaque de hafnium de la façon suivante :

. 2, 4, 6 et 8 zones d'épaisseurs égales
. 2 et 3 zones d'épaisseurs inégales.

Pour notre étude nous ne nous interessons qu'à des paramètres intégrés sur les cellules, on comparera donc ici uniquement des paramètres globaux.

Dans les tableaux suivants on trouvera le facteur de multiplication infini, la section efficace macroscopique (Σ_a) dans la plaque hafnium ainsi que le taux d'absorption (τ_a).

	Zones d'épaisseurs égales			
nombre de zones pour 2,5 mm de Hf	2	4	6	8
k_∞	1.16175	1.16190	1.16199	1.16206
τ_a	0.13354	0.13342	0.13335	0.13330
Σ_a	0.24809	0.24789	0.24777	0.24767

	Zones d'épaisseurs inégales	
nombre de zones pour 2,5 mm de Hf	2	3
k_∞	1.16186	1.16194
τ_a	0.13345	0.13339
Σ_a	0.24794	0.24783

Pour les calculs de zones d'épaisseurs inégales nous avons pris les abscisses suivantes :

0.0 0.18 0.25 - calcul 2 zones

0.0 0.12 0.20 0.25 calcul 3 zones

Le libre parcours moyen thermique des neutrons dans le hafnium étant d'environ 0,33 mm, nous avons découpé le rideau en une zone externe de 1 à 2 λ_{tr}^{th} (selon le cas), les zones internes pouvants être plus grandes.

A partir de ces résultats on peut voir qu'un découpage en trois zones inégales permet d'obtenir des résultats corrects puisque pratiquement convergés.

Ce découpage sera donc adopté pour tous nos calculs.

6.2 Effets en réactivité

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent nous établissons l'équivalence entre bore soluble et hafnium. Le titre en bore est de 595 ppm.

Nous rappelons l'expression de l'efficacité du hafnium pour le chargement i :

$$\mathcal{E}^{i}_{exp} = \frac{1}{2} (T_o - T_i)_{exp} \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_o + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_i \right]_{calcul}$$

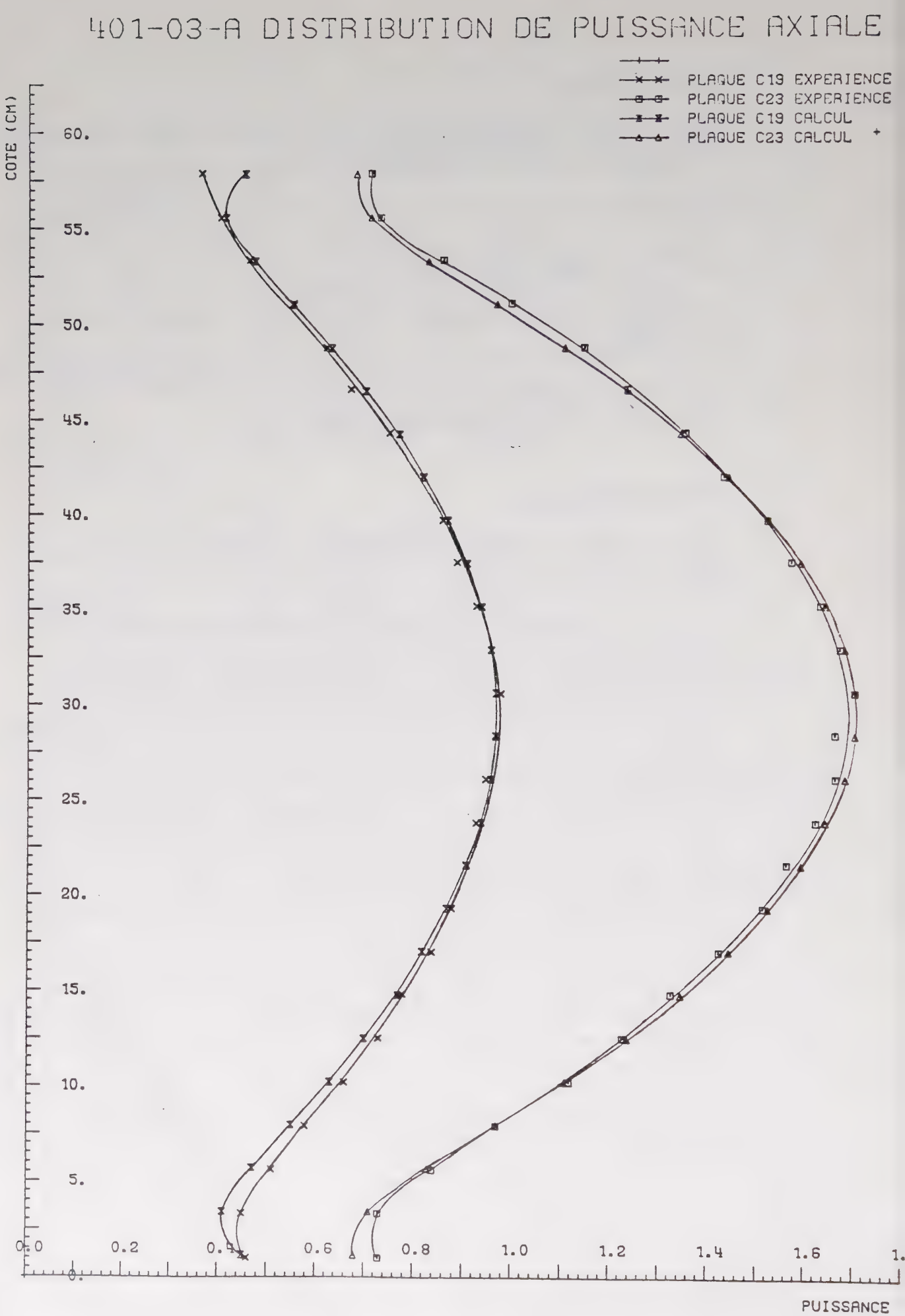
La valeur propre obtenue à l'issue du calcul de diffusion (synthèse 3D Icare) est : 1,00280.
Le rideau de hafnium de 5 mm complètement enfoncé aura donc uneefficacité de 9418 pcm.
Nous constatons en comparant à la valeur propre du coeur de référence (1,00550 en synthèse 3D) qu'elle est calculée avec une précision de 2,8 %.

6.3 Distribution de puissance

Les distributions de puissance radiales et axiales sont portées sur les tableaux et figures ci-après :

. Axialement : l'accord calcul-expérience pour les deux plaques sur lesquelles des mesures ont été faites est bon. Seuls les points à proximité des réflecteurs inférieur et supérieur s'écartent un peu des points mesurés, ce qui s'explique compte tenu des imperfections du traitement de l'interface coeur réflecteur.
Toutefois, le point supérieur de la plaque C19 s'écarte beaucoup plus de la mesure.
Pour notre calcul nous considérons que le haut du rideau de hafnium coincide avec le haut des plaques combustibles. En fait la hauteur du rideau de hafnium est de 120 cm, il va donc se prolonger dans le réflecteur supérieur, d'où un niveau de flux moins élevé au niveau du haut du combustible. Cet effet n'est pas pris en compte par notre calcul ce qui explique l'écart avec l'expérience pour le dernier caramel de la plaque C19.
On peut constater que cet effet n'est plus tellement sensible pour la plaque C23 qui est la cinquième plaque combustible à partir du rideau de hafnium.

. Radialement : le calcul restitue les distributions de puissance expérimentales de manière satisfaisante, les remarques faites au chapitre II-A étant ici encore valables : notamment la remonté de puissance sur les bords des plaques qui ne peut pas être pris en compte par le calcul.
Toutefois, les résultats obtenus sur certaines plaques sont légèrement en dehors des fourchettes d'incertitudes. Des problèmes liés au positionnement des plaques dans le coeur l'expliquent (voir chapitre II).


401-03-A DISTRIBUTION DE PUISSANCE AXIALE
PLAQUE C19 EXPERIENCE
PLAQUE C23 EXPERIENCE
PLAQUE C19 CALCUL
PLAQUE C23 CALCUL
COTE (CM)
60.
55.
50.
45.
40.
35.
30.
25.
20.
15.
10.
5.
0.
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
PUISSANCE

PLAQUE	A				B				C			
RANGEE	W	X	Y	Z	W	X	Y	Z	W	X	Y	Z
18	HAFNIUM											
19									0.73	0.71	0.72	0.73
20	0.52	0.63	0.63	0.52	0.73	0.80	0.82	0.68	0.85	0.87	0.86	0.87
21									1.11	1.11	1.11	1.13
22												
23									1.25	1.25	1.27	1.24
24												
25												
26									1.27	1.29	1.29	1.25
27												
28												
29									1.12	1.08	1.10	1.11
30												
31												
32												
33									0.08	0.07	0.07	0.07
34												
35												

DISTRIBUTION DE PUISSANCE EXPERIMENTALE (401-03-A)

PLAQUE	A				B				C			
RANGEE	W	X	Y	Z	W	X	Y	Z	W	X	Y	Z
18	HAFNIUM											
19									0.74	0.78	0.78	0.74
20	0.53	0.61	0.63	0.52	0.75	0.84	0.86	0.84	0.87	0.89	0.87	0.87
21									1.11	1.14	1.14	1.11
22												
23									1.23	1.24	1.24	1.22
24												
25												
26									1.23	1.25	1.25	1.23
27												
28												
29									1.17	1.14	1.14	1.12
30												
31												
32												
33									0.05	0.05	0.05	0.05
34												
35												

DISTRIBUTION DE PUISSANCE CALCULEE (401-03-A)

VII CONFIGURATION AVEC LE RIDEAU DE HAFNIUM PARTIELLEMENT ENFONCE

7.1 Rideau de hafnium enfoncé à la côte H/4

Nous étudierons tout d'abord la configuration pour laquelle le rideau est enfoncé à H/4.

7.1.1 Effet en réactivité

Nous avons obtenu, à la suite du calcul de coeur, une valeur propre de 1,00435 pour un titre de 657 ppm.
(Remarque : La côte d'enfoncement ne correspond pas exactement à H/4, mais se situe 3 mm plus bas).

L'efficacité du rideau de hafnium sera de 8362 pcm.

L'écart sur l'efficacité entre calcul et expérience est de 1,4 %.

7.1.2 Distributions de puissance

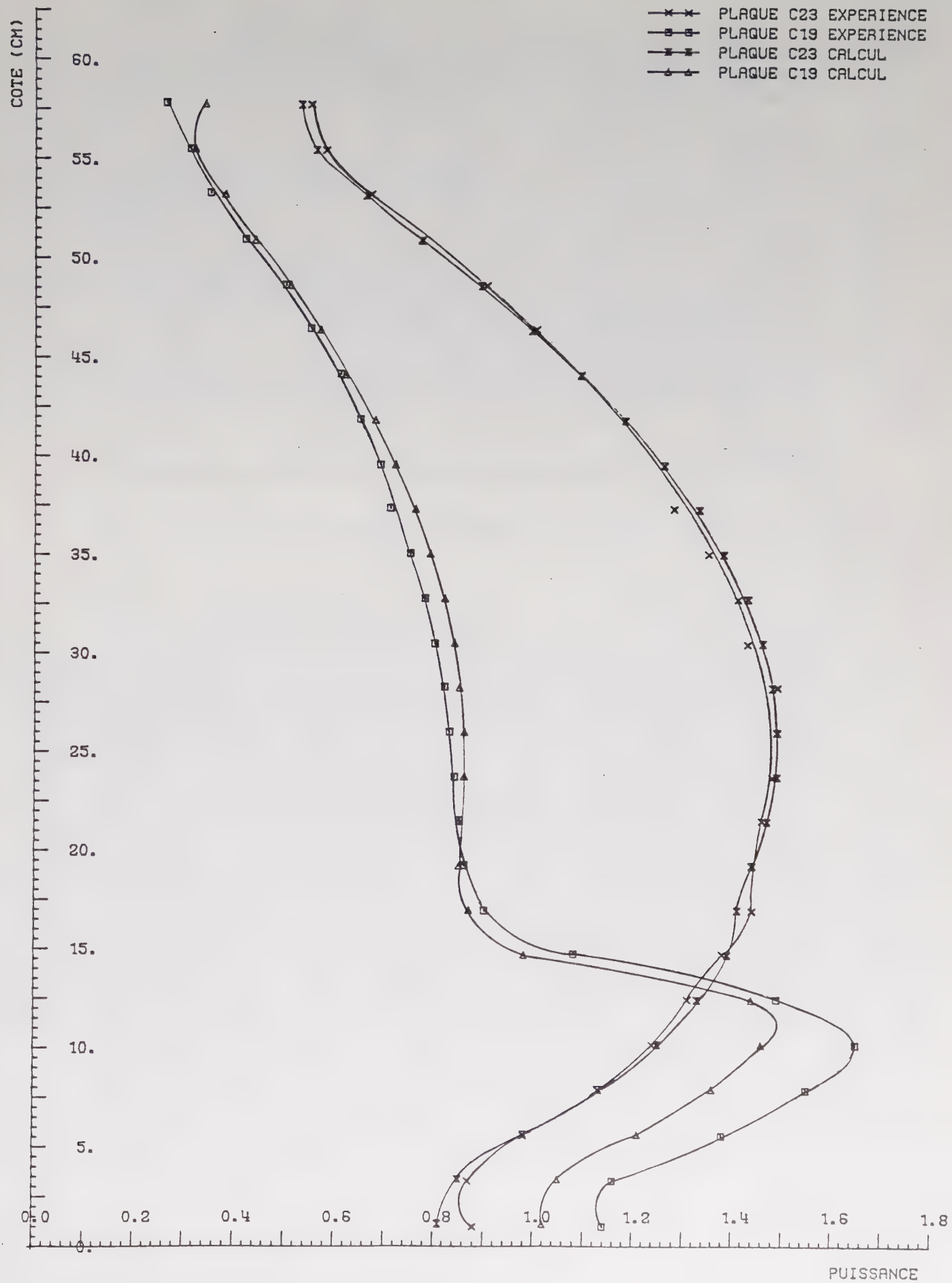
Elles sont portées sur le tableau et la courbe ci-après :

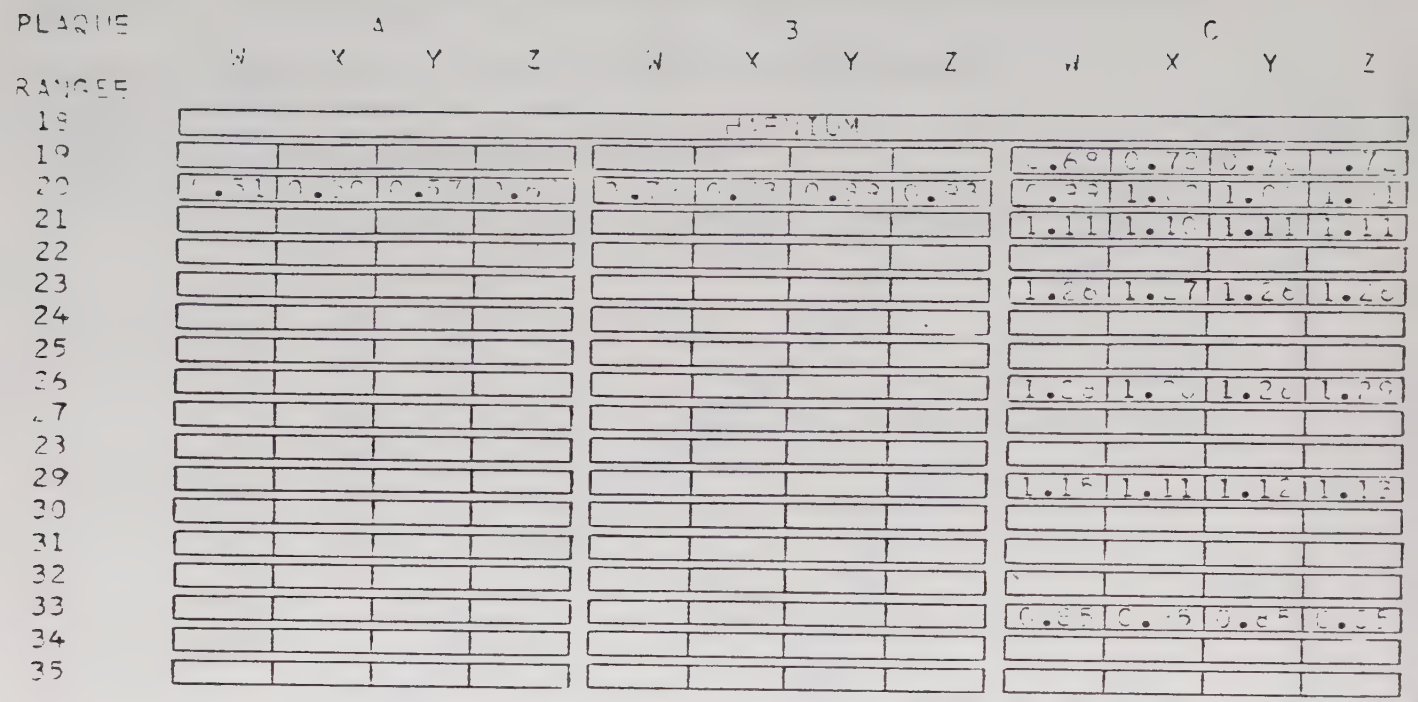
. Axialement : la distribution de puissance pour la plaque C23 est correctement déterminé par le calcul.
Pour la plaque C19, voisine du rideau de hafnium, nous observons un basculement de flux par rapport au bas du rideau de hafnium, entre le calcul et l'expérience. Le pic de puissance dans la partie inférieure étant sous-estimé par le calcul. La puissance pour les caramels situés dans la partie supérieure (en regard du rideau), est quant à elle surestimée par le calcul.

Il semble donc, que la méthode de synthèse ait tendance a atténuer les écarts de puissance entre une zone soumise à l'influence d'un absorbant et une autre qui ne l'est pas.
Le gradient de flux à la limite du bas du rideau est bien restitué par le calcul.
Les remarques faites au paragraphe précédent pour les points de mesure à proximité du réflecteur, notamment le point supérieur de la plaque C19, sont transposables ici.

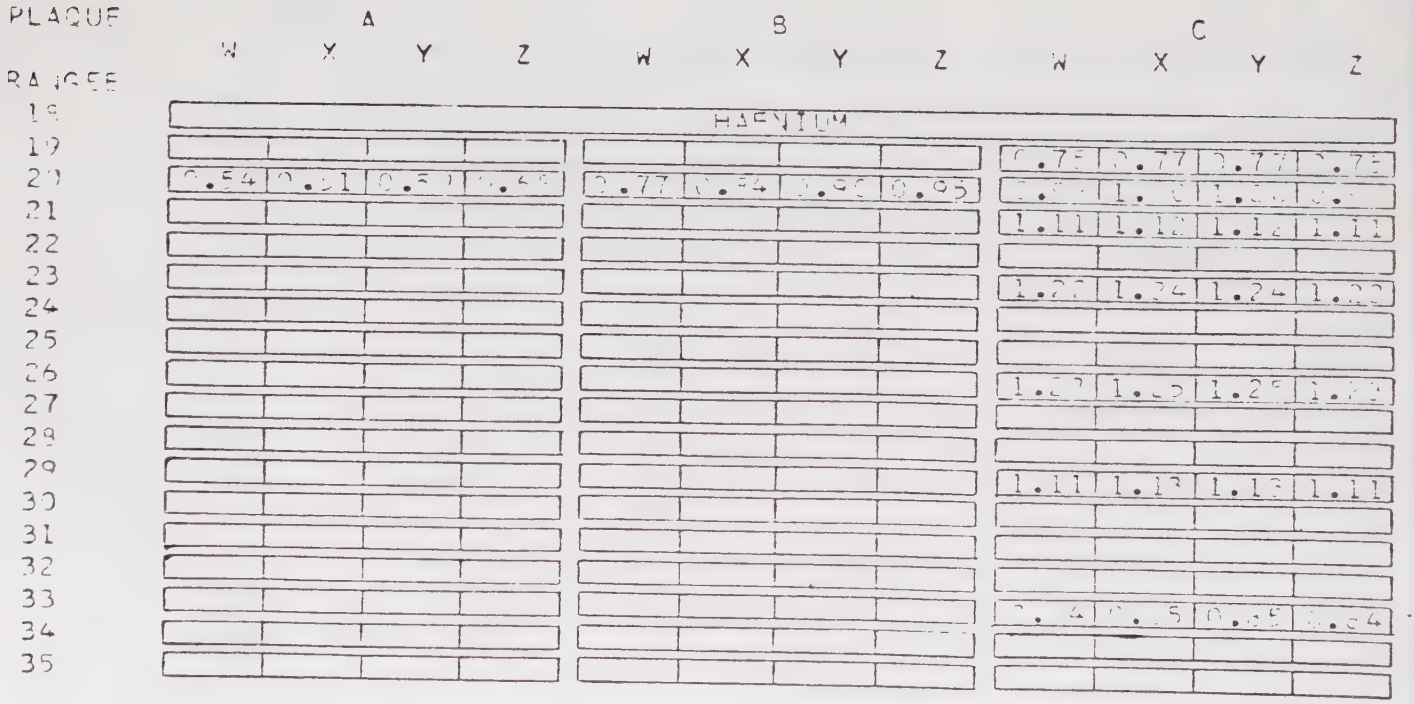
. Radialement : la distribution de puissance calculée est dans l'ensemble satisfaisante, compte tenu des problèmes expérimentaux (tenue des plaques, effets de sabre, ...). Ceux ci sont clairement mis en évidence sur la plaque C26. En effet des mesures ont été faites sur la plaque symétrique par rapport au rideau de hafnium. On obtient des écarts de près de 5 % entre les deux plaques. Or ce coeur est par construction absolument symétrique par rapport à

401-03-B DISTRIBUTION DE PUISSANCE AXIALE





DISTRIBUTION DE PUISSANCE EXPERIMENTALE (401-03-5)



DISTRIBUTION DE PUISSANCE CALCULEE (401-03-5)

la rangée centrale.
On ne peut donc mettre en cause qu'un effet de positionnement ou de tenue des plaques. Il n'est donc pas étonnant de trouver des écarts calcul expérience qui soient plus grands que l'incertitude moyenne des mesures.

7.2 Rideau de hafnium enfoncé à la côte H/2

Nous allons maintenant envisager la configuration où le rideau est enfoncé à H/2.
Aucune mesure de distribution de puissance n'a été effectué.
Les résultats obtenus sont les suivants :
- pour un titre en bore de 881 ppm, la valeur propre est de 1,00290.

L'efficacité du rideau étant de 5069 pcm. L'écart entre calcul et expérience est ici de 5,0 %. On voit qu'il est supérieur au cas où le rideau était enfoncé à H/4.

VIII CONFIGURATIONS AVEC DES RIDEAUX D'EPAISSEURS DIFFERENTES ET AVEC LAME D'EAU INTERNE

Nous allons étudier des chargements constitués avec des rideaux d'épaisseurs suivantes :

0.7 mm ; 1.4 mm ; 2.8 mm

ainsi que le rideau avec lame d'eau interne :

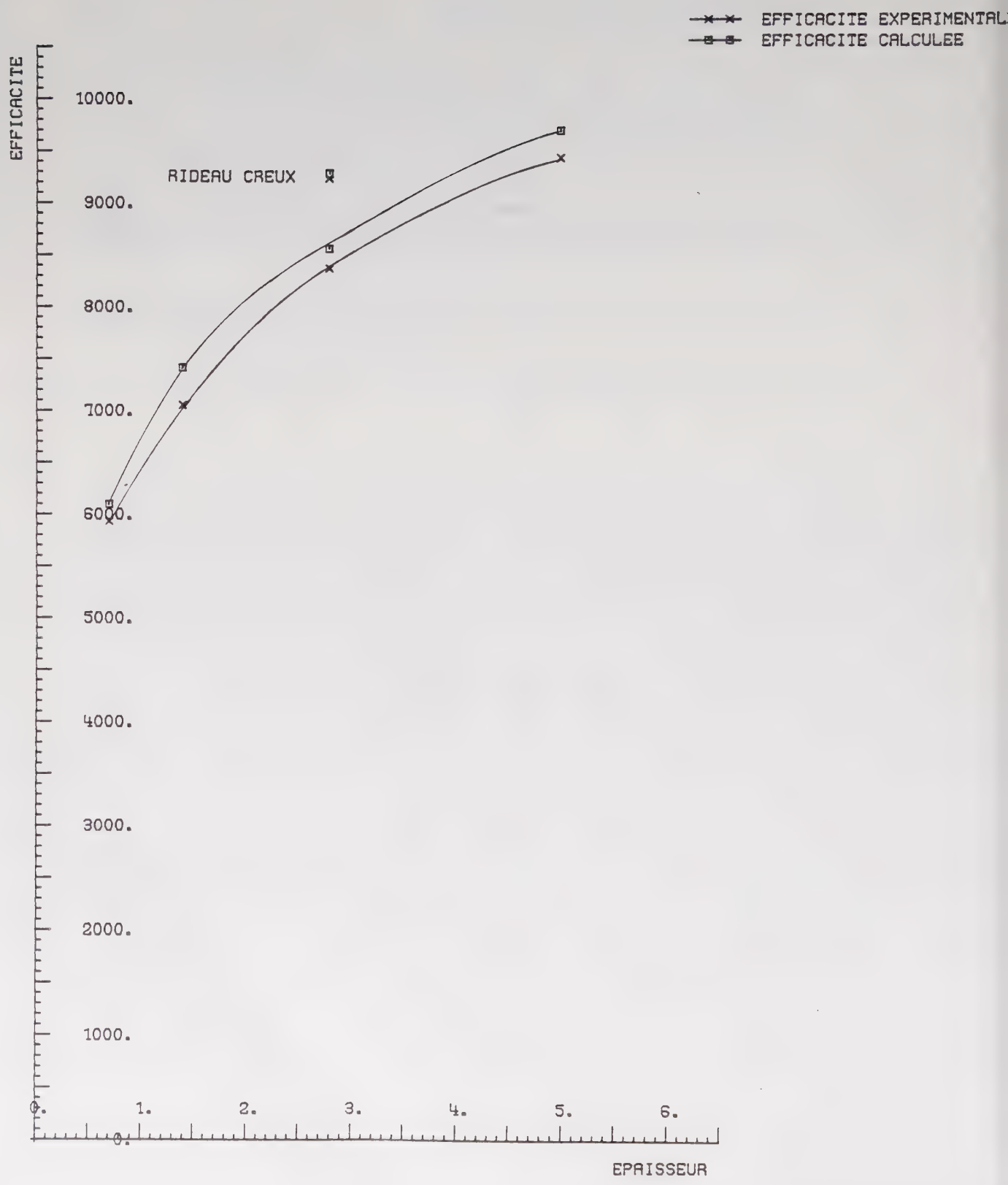
épaisseur totale (hors gaine)	5.0 mm
épaisseur lame d'eau interne	2.2 mm
épaisseur hafnium	2.8 mm

Pour ces essais seul le titre en bore a été mesuré.
Aucune distribution de puissance par γ scanning n'a été effectuée.

Dans le tableau suivant nous avons porté les principaux résultats calculés et expérimentaux pour les différentes situations.

Epaisseur du rideau	0.7 mm	1.4 mm	2.8 mm	Creux
Titre critique	813	742	655	606
Valeur propre (2D)	1,00428	1,00231	1,00402	1,00641
Efficacité expérimentale	5930	7047	8361	9227
Efficacité calculée	6095	7409	8551	9273
$\Delta\lambda/\lambda/\mathcal{E}$	+ 2,7 %	+ 4,9 %	+ 2,2 %	- 0,5 %

EFFICACITE DES RIDEAUX EN FONCTION DE L'EPAISSEUR



On voit que les calculs s'écartent de quelques pourcents des valeurs expérimentales. Nous devons avoir présent à l'esprit que les titres en bore annoncés sont des titres estimés. Les incertitudes sur ces titres sont donc beaucoup plus importantes que pour les autres essais (Chapitre II et III-B).

Sur la figure ci-après nous avons tracé l'efficacité des différents rideaux en fonction de leur épaisseur. L'efficacité de l'absorbant n'est pas proportionnelle à l'épaisseur, et nous constatons qu'à partir d'une certaine épaisseur il va y avoir un phénomène de saturation.

Le passage d'une épaisseur de 0,7 mm à 5,0 mm, soit une augmentation de poids de hafnium de 610 % entraine un accroissement de l'efficacité de 59 %.

Entre 0,7 mm et 1,4 mm, l'augmentation en poids est de 100 %, on obtient une variation d'efficacité de 19 %.

Si on détermine ces variations entre les rideaux de 2,8 mm et 5,0 mm d'épaisseur, l'augmentation de poids de 80 % conduit à un gain en efficacité de 13 %.

Il est donc évident qu'à partir d'une certaine épaisseur du rideau, le rapport gain en efficacité obtenue à l'augmentation de hafnium nécessaire va devenir très pénélisant. C'est pour cela que pour les réseaux de propulsion navale l'utilisation de croix creuses a été envisagée. Nous avons donc dans le cadre de ces essais étudié une configuration avec un rideau creux.

Nos résultats montrent que pour un poids de hafnium égal (2,8 mm d'épaisseur), le gain en efficacité est d'environ 10 %.

En comparant avec le rideau de 5 mm, nous voyons qu'une diminution de 45 % en poids de hafnium, donne une efficacité qui est seulement 2 % plus faible.

Nous avons étudié la répartition des absorptions dans le hafnium en fonction de l'énergie pour les rideaux d'épaisseur 2,8 mm et le rideau creux.

Nous portons dans le tableau suivant les résultats obtenus à partir des calculs Apollo sur la géométrie à une dimension traitant l'absorbant dans son environnement.

	Taux d'absorption dans le hafnium	
Groupe	Rideau creux	Rideau de 2,8 mm
1	0.0740	0.0745
2	0.9260	0.9255
3	30.0166	26.4180
4	22.5431	22.0022

(les résultats sont normalisés à 1 neutron absorbé dans le domaine rapide).

Nous voyons entre ces deux rideaux une répartition différente, des absorptions dans les groupes 3 et 4. La présence d'une lame d'eau interne augmente l'absorption dans le domaine thermique (légèrement) et épithermique.

On peut dire que la lame d'eau interne va ralentir les neutrons ayant passé la première épaisseur de hafnium jusqu'à un niveau d'énergie (thermique ou épithermique) tel qu'ils seront plus probablement absorbés par le hafnium. Cette lame d'eau interne peut être comparée en quelque sorte à un "piège" pour les neutrons rapides, qui compte tenu de leur énergie traverseraient le rideau sans être absorbés en son absence.

Nous voyons donc tout l'intérêt que peut présenter une croix creuse en hafnium.
Il est évident que dans un tel cadre on peut jouer aussi bien sur l'épaisseur de la lame d'eau que sur l'épaisseur de hafnium. Des études ont été menées [25] sur de véritables géométries de croix de contrôle en vue de déterminer l'optimum de ces deux paramètres. Il semble que l'on puisse obtenir une même efficacité avec une croix pleine de 5 mm et une croix creuse avec lame d'eau de 4 mm et une épaisseur de hafnium de 2 x 1,5 mm. C'est-à-dire qu'a efficacité identique on peut gagner 40 % en poids, ce qui rejoint nos résultats.

IX ANALYSE DES RESULTATS

Pour notre étude, le calcul des configurations avec le rideau partiellement enfoncé a été fait avec une méthode de synthèse.

Les résultats obtenus avec le rideau enfoncé à H/4 montrent de légers écarts, pour la distribution de puissance axiale sur la plaque proche de l'absorbant, par rapport à l'expérience. On peut les imputer à notre méthode de calcul. En effet nous superposons dans le coeur des compositions, pour les différentes tranches, issues de calcul effectué en considérant les cellules axialement infini et homogène (calcul Apollo). Il est bien évident que le flux et le spectre d'homogénéisation et de condensation ainsi faites ne correspondent pas du tout au flux et spectre que nous aurons dans le coeur à proximité de la frontière entre les deux

tranches axiales.

On conçoit aussi que le problème du traitement de l'interface coeur réflecteur lors du calcul de synthèse va, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, entrainer des erreurs, puisqu'il s'agit en fait d'un calcul axial à une dimension.

En fonction de cela on peut estimer satisfaisant la précision des résultats obtenus par la méthode de synthèse, compte tenu du très faible coût de ces calculs par rapport à des vrais calculs à 3 dimensions.

Les configurations avec des rideaux d'épaisseurs croissantes ont montré que l'on atteint rapidement un faible gain en efficacité par rapport à l'augmentation du poids de hafnium.

L'utilisation d'un rideau creux présente un grand intérêt, puisqu'une diminution de 45 % du poids de hafnium (par la formation d'une lame d'eau interne de 2,2 mm) entraîne une baisse de seulement 2 % en efficacité.

Nos résultats sont déterminées par le calcul à quelques pourcents. Nous rappelons que nous ne disposons que de valeurs expérimentales estimées (pour les titres en bore).

Pour tirer une conclusion plus précise il faudrait disposer des mesures définitives effectuées par dosage chimique.

On a pu constater néanmoins que l'efficacité d'un rideau avec une lame d'eau interne semble bien déterminé par le calcul.

B - INTERPRETATION DES EXPERIENCES "AZUR-CAP 1800" RELATIVES AUX CRAYONS DE HAFNIUM

Nous avons repris ici l'interprétation des essais qui font partie de la même campagne d'expériences que les essais relatifs aux crayons d'UO_2 - Gd_2O_3 déjà traités dans le chapitre II [8] - [26].

Ces essais avec crayons de hafnium ont également été interprétés une première fois en 1976 [9].

Comme dans le chapitre II, nous avons repris ici cette étude compte tenu des améliorations récentes du schéma de calcul et des bibliothèques de données.

I PRESENTATION DES ESSAIS

1.1 Description du coeur et objectifs

La description du coeur a déjà été faite au chapitre II.

Nous nous sommes limités dans cette partie à l'étude des trois configurations avec crayons de hafnium.

1.2 Composants du coeur

Les composants du coeur restent inchangés. Nous ne décrirons en détail que les crayons absorbants. Ce sont des crayons de hafnium non gainés. Ils ont une longueur totale de 1835 mm et leur partie absorbante est de 1645 mm (le reste du crayon est composé de Zircalloy). Dans tous les essais ils sont centrés sur le combustible. Leur diamètre est de 9,72 mm. Des analyses ont été faites pour évaluer les diverses impuretés présentes dans ces crayons : il s'agit essentiellement de Zr (3,3 % du poids). Les autres impuretés (Al, C, Cu, Mn, Si, Ti, Cr, Fe) sont à l'état de trace et sont inférieures au millième du poids.

1.3 Configurations étudiés

En plus de la configuration de référence déjà étudiée au chapitre II, nous nous sommes intéressés aux trois configurations suivantes :

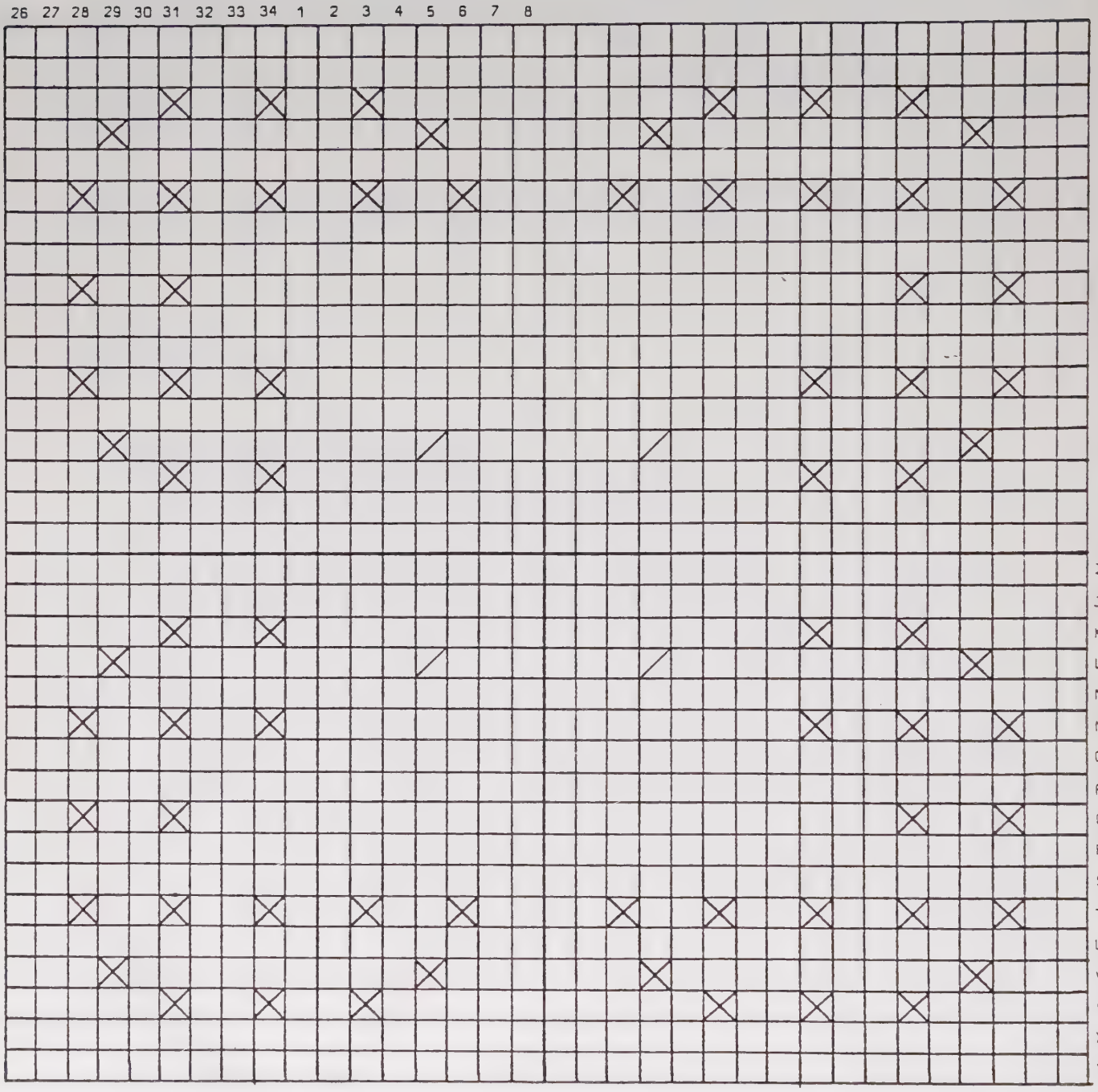
. La configuration avec quatre crayons de hafnium (chargement N° 344).

. La configuration avec huit crayons de hafnium, deux par assemblage (chargement N° 345).

. La configuration avec huit crayons de hafnium couplés, quatre crayons dans deux assemblages (chargement N° 346).
(voir figure ci-dessous).

CONFIGURATION N° 344

4 crayons Hf



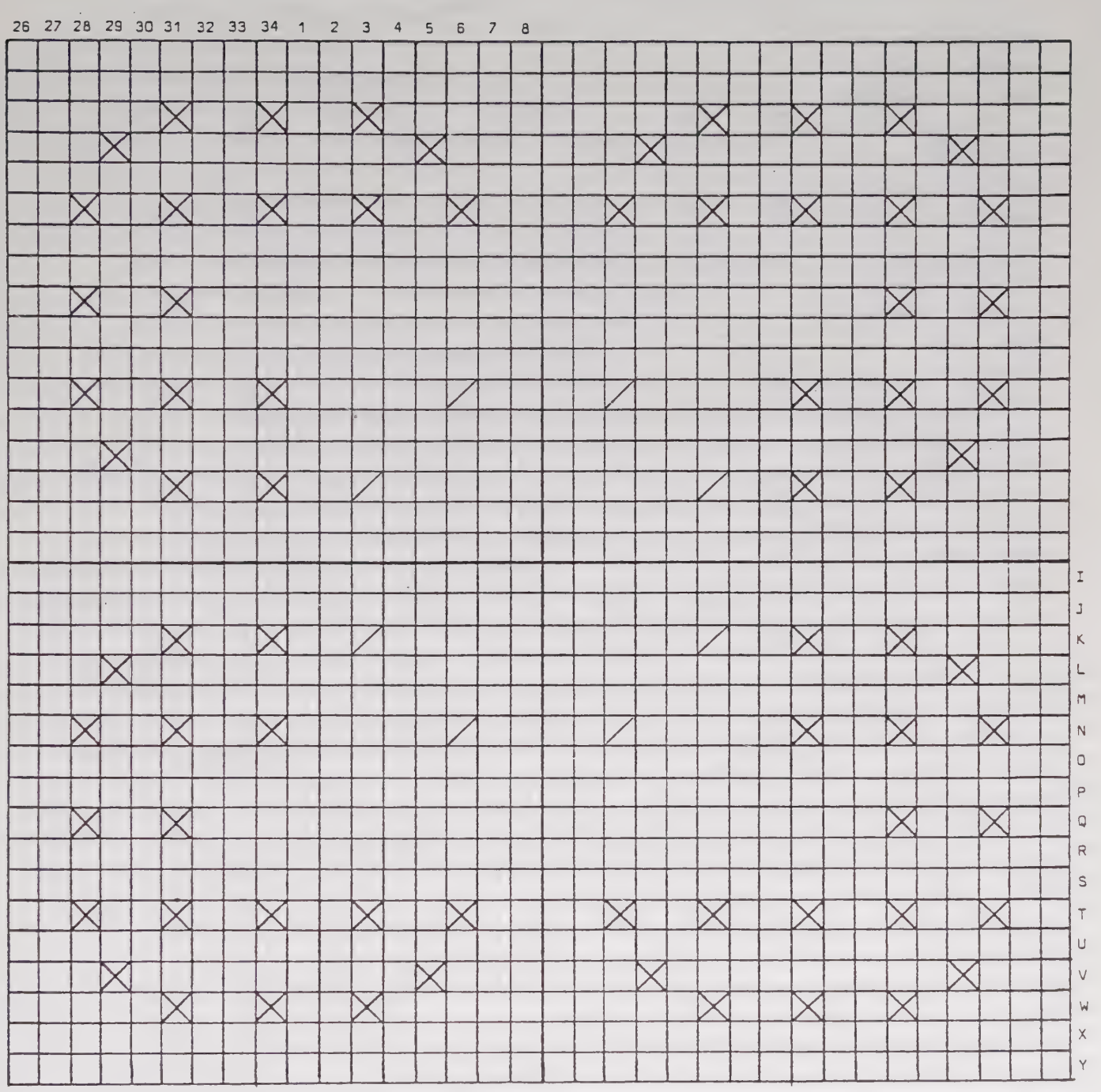
Crayon UO_2 (6,2 %)

Trou d'eau

Crayon Hf

CONFIGURATION N° 345

8 crayons Hf



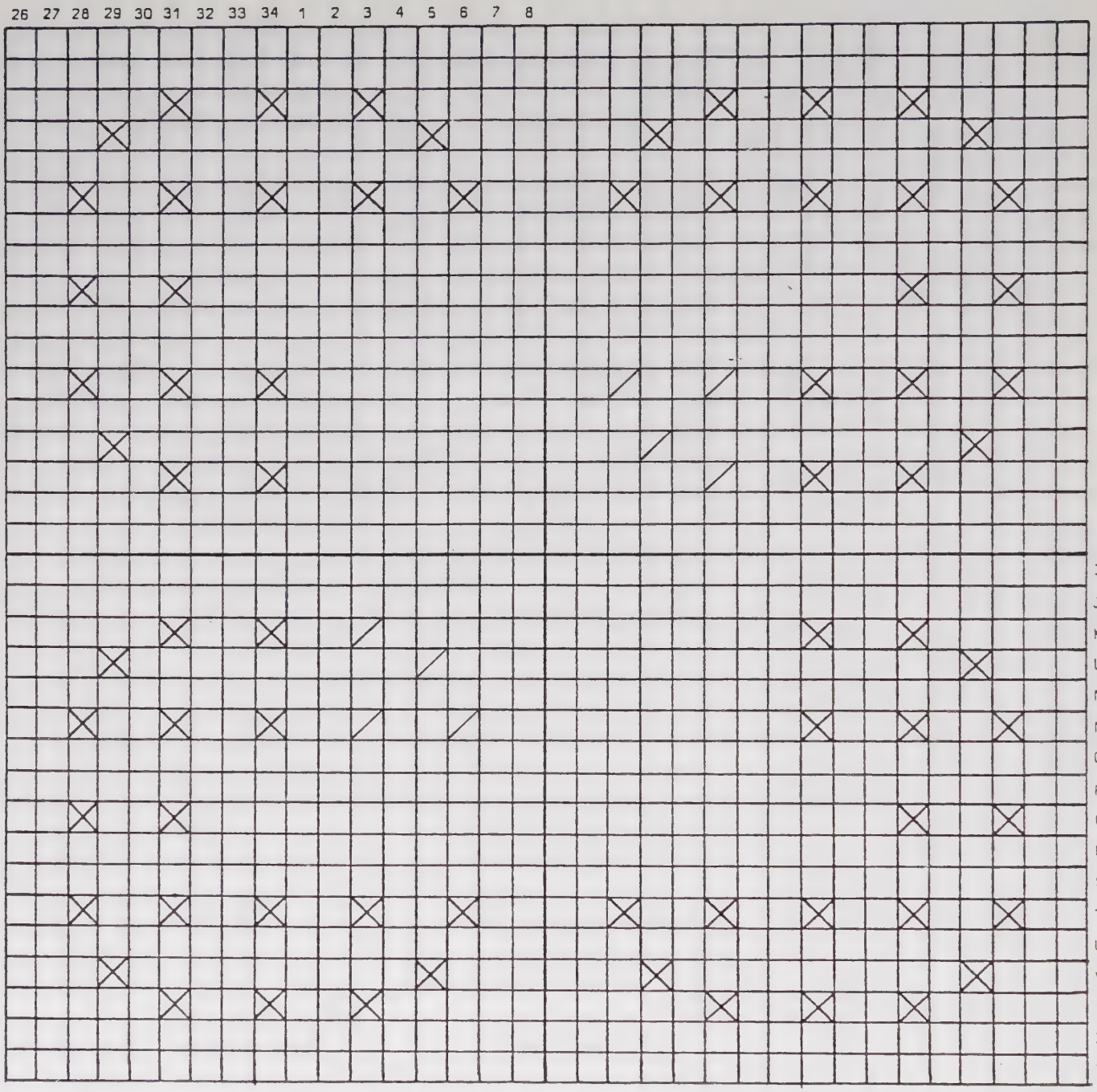
Crayon UO_2 (6,2 %)

Trou d'eau

Crayon Hf

CONFIGURATION N° 346

8 crayons Hf couplés



Crayon UO_2 (6,2 %)

Trou d'eau

Crayon Hf

1.4 Mesures effectuées

Les essais interprétés sont faits à 20°C et seules des mesures radiales dans le plan médian ont pu être réalisées.

1.4.1 Les différentes mesures

Comme pour les autres essais, il a été généralement mesuré :

. Le titre critique en bore soluble par dosage chimique;

. Des distributions de puissance entre différents crayons des assemblages par comparaison de leur activité γ après irradiation.

1.4.2 Incertitudes expérimentales

Comme nous l'avons vu le titre en bore est connu avec une précision de l'ordre de 0,5 % en absolu. Les configurations sont étudiées en relatif par rapport à la configuration de référence, la précision sur la différence des titres est augmentée (de l'ordre de $\pm$ 4 ppm de bore) (Voir annexe A).
Les mesures de répartition de puissance sont quant à elles connues à $\pm$ 1 %.

II METHODE DE CALCUL

2.1 Schéma utilisé

Le schéma de calcul utilisé est en tout point comparable à celui utilisé dans le chapitre II (partie B). Le traitement des hétérogénéités dans leur environnement se fera de la même façon.

2.2 Traitement du poison hafnié

Pour calculer le poison gadolinié dans son environnement nous nous sommes limité ici à l'utilisation du module Eurydice dans ses différentes options. L'emploi du module Nausicaa n'a pas été envisagé puisque l'étude précédente (chapitre II) n'avait pas fait apparaître d'améliorations très grandes.

2.3 Normalisation des résultats de distribution de puissance

Comme précédemment les résultats sont normalisés de façon que les sommes des valeurs expérimentales et calculées soient égales.

III BIBLIOTHEQUE UTILISEE

Pour la zone combustible les isotopes utilisés sont les mêmes que dans le B chapitre II.

Pour le hafnium nous avons employé l'isotope de hafnium naturel (numéro Apollib 280, associé à l'isotope effectif 1280) autoprotégé.

Les calculs seront ici effectués à 99 groupes d'énergie.

IV CONFIGURATION DE REFERENCE

Cette configuration a déjà été étudié au B du chapitre II. Nous rappelons les principaux résultats.

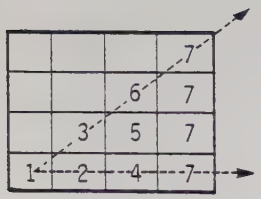
La valeur propre du coeur est 1,00566.
La valeur de l'efficacité du ppm de bore calculée est de 7,7 pcm/ppm et recoupe la valeur expérimentale 7,6 pcm $\pm$ 0,5 pcm.

V CONFIGURATION AVEC POISON SANS INTERACTION

La configuration étudiée ici est celle ou nous avons un seul crayon de hafnium par assemblage (chargement 344 - voir § 1.3).

5.1 Calculs effectués

La géométrie multicellule retenue pour traiter le crayon de hafnium dans son environnement par le module Eurydice est représenté ci-dessous.



Cellule numéro 1 : crayon hafnium
Cellules N° 2 à 7 : crayons UO_2

5.2 Découpage géométrique des crayons de hafnium

L'effet de la discrétisation sur les résultats du calcul de la structure fine de flux peut être étudié par la comparaison entre des calculs qui sont faits avec des nombres différents de zones dans le crayon de hafnium. Nous pouvons ainsi déterminer le nombre de zones nécessaire dans le crayon absorbant. Pour cela plusieurs calculs ont été effectués en découpant le crayon en couronnes de la manière suivante :

- 2, 4, 6, 8 et 10 couronnes d'épaisseurs égales
- 2, 4, 6, 8 et 10 couronnes de surfaces égales.

Dans les tableaux suivants sont portés les paramètres globaux suivants :

. le facteur de multiplication infini,
. la section efficace macroscopique dans le crayon de hafnium,
. le taux d'absorption dans le crayon de hafnium.

Zones d'épaisseurs égales			
nombre de zones	k_∞	τ_a	Σ_a
2	1.22511	0.050220	0.23598
4	1.22521	0.050153	0.23572
6	1.22527	0.050118	0.23557
8	1.22530	0.050095	0.23547
10	1.22533	0.050076	0.23538

Zones de surfaces égales			
nombre de zones	k_∞	τ_a	Σ_a
2	1.22518	0.050174	0.23580
4	1.22529	0.050102	0.23550
6	1.22535	0.050066	0.23534
8	1.22539	0.050040	0.23522
10	1.22542	0.050020	0.23513

On peut voir que les paramètres globaux sur l'ensemble du crayon sont bien calculés avec un nombre limité de couronnes.

Pour un même nombre de couronnes, un calcul avec un découpage en surfaces égales, donnera de meilleurs résultats qu'un calcul utilisant un découpage avec épaisseurs égales. On sait en effet que dans un calcul l'épaisseur des zones extérieures du crayon doit être plus faible que l'épaisseur des zones intérieures puisque le gradient du flux est fort à la surface et plus faible au centre.

Nous voyons qu'un découpage en quatre zones de surface égales est suffisant pour notre étude qui ne portera que sur des paramètres intégrés sur une cellule.

5.3 Résultats

5.3.1 Effets en réactivité

Nous établissons l'équivalence entre bore soluble et hafnium.
Le titre expérimental en bore est ici de 1877 ppm. Nous rappelons l'expression de l'efficacité du hafnium pour le chargement i :

$$\mathcal{E}^{i}_{exp} = \frac{1}{2}\,(T_o - T_i)_{exp}\left[\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_o + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_i\right]_{calcul}$$

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

Pour cette configuration l'efficacité $\mathcal{E}^{i}_{exp}$ est égale à - 2364 pcm.

Module du calcul transport	Eurydice Roth	Eurydice Roth x4	Eurydice DP00	Eurydice DP01
Valeur propre	1,00633	1,00551	1,00534	1,00552
$\Delta\varepsilon$ (pcm)	+67	-15	-32	-14
$\Delta\varepsilon$/efficacité	-2,8 %	+0,6 %	+1,3 %	+0,6 %

Nous observons une légère dérive de la valeur propre en fonction de l'option de calcul transport, comme nous l'avions observé au chapitre II (B), l'amplitude des écarts étant moins grande.

Remarque : Nous savons que la partie active des crayons de hafnium est inférieure à celle des crayons combustibles. Des calculs faits à l'aide du code Icare, prenant en compte ces hétérogénéités axiales, nous ont permis de déterminer l'effet lié à cette troncature (effet qui représente environ 0,4 % de l'efficacité des absorbants). Les valeurs annoncées dans le tableau ci-dessus (ainsi que pour les configurations suivantes) tiennent compte de cette correction.

5.3.2 Distribution de puissance

Dans les tableaux suivants nous avons porté les distributions de puissance expérimentales et calculées. Les remarques que nous ferons à partir de ces résultats sont de deux ordres :

. Considérons tout d'abord les distributions azimutales autour du crayon de hafnium en relatif d'un crayon à l'autre.
On voit avec l'option Roth les écarts peuvent aller jusqu'à plus de 2 % (par exemple crayons L6 et K6). Ce qui montre que les gradients de flux autour du crayon absorbant ne sont pas très bien pris en compte.

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.498 1.505 -0.5
J							1.476 1.473 +0.2	
K						1.333 1.343 -0.7		
L					HF	1.238 1.221 +1.4		1.440 1.440 0.0
M				1.250 1.250 0.0				
N								
O								
P	1.162 1.158 +0.3				1.268 1.277 -0.7			

CONFIGURATION N°344-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE POTH)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.498 1.494 +0.3
J							1.476 1.468 +0.5	
K						1.333 1.352 -1.4		
L					HF	1.238 1.243 -0.4		1.440 1.427 +0.9
M				1.250 1.260 -0.8				
N								
O								
P	1.162 1.153 +0.8				1.268 1.269 -0.01			

CONFIGURATION N°344-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE POTHX4)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.498 1.489 +0.6
J							1.476 1.463 +0.9	
K						1.333 1.354 -1.5		
L					HF	1.238 1.257 +1.5		1.440 1.422 +1.3
M				1.250 1.262 -1.0				
N								
O								
P	1.162 1.151 +1.0				1.268 1.267 +0.01			

CONFIGURATION N°344-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE DP00)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.498 1.480 +1.2
J							1.476 1.457 +1.3	
K						1.333 1.366 -2.4		
L					HF	1.238 1.267 -2.3		1.440 1.412 +2.0
M				1.250 1.274 -1.9				
N								
O								
P	1.162 1.146 +1.4				1.268 1.263 -0.04			

CONFIGURATION N°344-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE DP01)

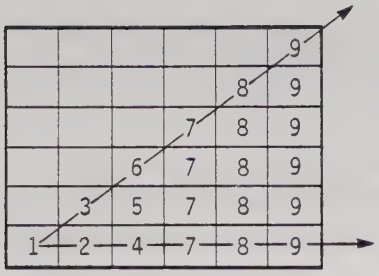
Avec l'option Roth x4 du module Eurydice les écarts d'un crayon à l'autre diminuent (inférieur à 1 %). Cet effet est encore plus marqué avec l'utilisation des options DP00 et DP01 (écarts de 0,4 % à 0,5 %).
On constate donc qu'avec l'utilisation de modules plus perfectionnés, les gradients de flux sont correctement calculés autour du crayon absorbant (l'absence de mesure dans le hafnium nous empêche de conclure quant au gradient absorbant combustible avoisinant).

. Du point de vue global, sur toute la zone de mesure. Les écarts entre la zone entourant le crayon de hafnium et la zone périphérique vont en s'accroissant lorsque l'option de calcul de transport est plus sophistiquée. En effet, avec l'utilisation de l'option Roth, il y a un écart d'environ 1 %, alors que pour l'option DP01 l'écart entre zone centrale et périphérique atteint un maximum de 3,8 %.
On assiste à un basculement entre la région entourant l'absorbant, où les valeurs calculées sont supérieures à l'expérience, et la région périphérique où les valeurs calculées sont inférieures à l'expérience.

Afin d'expliquer au moins qualitativement ce phénomène, nous nous sommes attachés à mettre en évidence les causes d'erreur les plus probables.

Dans un premier temps, on pourrait penser que le motif multicellule que nous avons utilisé n'était pas suffisamment étendu pour assurer la continuité, du point de vue du spectre, avec les cellules asymptotiques qu'on lui juxtaposait lors du calcul de coeur.

Pour vérifier cette hypothèse nous avons repris les calculs, précédents en agrandissant le motif à l'aide de deux types de cellule supplémentaire à la périphérie. La nouvelle géométrie ainsi constituée est représentée ci-dessous.



Cellule N° 1 : Crayon hafnium

Cellule N° 2 à 9 : Crayon UO_2

Les résultats obtenus après le calcul de coeur sont du point de vue de la réactivité portés sur le tableau suivant :

Module du calcul de transport	Eurydice Roth	Eurydice Roth x4	Eurydice DP00
Valeur propre	1,00611	1,00563	1,00561
$\Delta\varepsilon$(pcm)	+45	-3	-5
$\Delta\varepsilon$/efficacité	-2,0 %	+0,1 %	+0,2 %

Les écarts obtenus sur la valeur propre par rapport à la configuration de référence sont un peu plus faibles que pour les calculs utilisant la géométrie multicellule à 7 cellules.

Les distributions de puissance obtenues sont portées sur les tableaux suivants. On ne constate pas une différence significative par rapport au premier cas.

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.498 1.506 -0.5
J							1.476 1.467 +0.6	
K						1.333 1.336 -0.2		
L					HF	1.238 1.214 +2.0		1.440 1.441 -0.01
M				1.250 1.245 +0.4				
N								
O								
P	1.162 1.171 -0.8				1.268 1.264 -1.2			

CONFIGURATION N°344-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE ROTH)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.498 1.495 +0.2
J							1.476 1.464 +0.8	
K						1.333 1.349 -1.2		
L					HF	1.238 1.241 -0.3		1.440 1.428 +0.8
M				1.250 1.260 -0.8				
N								
O								
P	1.162 1.160 +0.2				1.268 1.269 -0.01			

CONFIGURATION N°344-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE ROTHX4)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.498 1.489 +0.6
J							1.476 1.460 +1.0	
K						1.333 1.354 -1.6		
L					HF	1.238 1.259 -1.7		1.440 1.420 +1.4
M				1.250 1.266 -1.3				
N								
O								
P	1.162 1.153 +0.9				1.268 1.264 +0.3			

CONFIGURATION N°344-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL TRANSPORT : EURYDICE DP00)

Il semble donc que la cause du basculement de flux entre la zone centrale (autour du crayon de hafnium) et la périphérie de la région des mesures, ne soit pas due essentiellement à la taille du motif traité.

Une seconde source d'erreur peut provenir directement de la répartition en types de cellule.
Dans le cas le plus favorable, on peut distinguer chaque cellule du motif, compte tenu des symétries, à la fois en fonction de leurs propriétés physiques et de leur position.
C'était le cas pour la géométrie traitée au chapitre II B avec les absorbants à base d'UO_2-Gd_2O_3 (configuration N° 341).

Dans la situation présente, la position des crayons de hafnium est telle que l'on peut difficilement, compte tenu des limitations des codes, distinguer par un type particulier toutes les cellules en fonction de leur position réelle.

Dans la géométrie représentée ici, on calculera pour les cellules N° 7 un flux moyen sur toute la couronne externe, alors que dans la réalité le niveau de flux varie entre deux positions extrêmes du motif (I8 et O2).

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
I		7	7	7	7	7	7	7	Centre du coeur
J		7	6	5	4	5	6	7	
K		7	5	3	2	3	5	7	
L		7	4	2	1	2	4	7	
M		7	5	3	2	3	5	7	
N		7	6	5	4	5	6	7	
O		7	7	7	7	7	7	7	XINF
P									

YINF

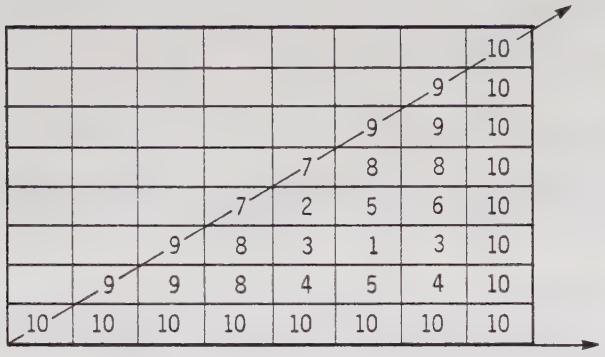
La condition de symétrie sur les axes XINF et YINF n'est pas réaliste.

Dans ces conditions, on conçoit que la distribution de puissance découlant de cette approximation laisse apparaître un basculement par rapport aux mesures. (Le basculement était très faible pour la configuration N° 341 étudié au chapitre II B).

VI CONFIGURATION AVEC POISONS EN INTERACTION

Nous exposons ici les résultats obtenus avec la configuration à 8 crayons de hafnium (deux par assemblage) (chargement 345 - Voir § 1.3).

Le dessin ci-dessous représente la géométrie multicellule utilisée pour traiter les crayons de hafnium dans leur environnement lors du calcul de transport.



Cellule N° 1 : Crayon de hafnium
Cellule N° 2 - 10 : Crayon UO_2

Pour cette configuration nous ne disposons pas de mesure de distribution de puissance expérimentale. Seul le titre en bore critique a été mesuré, il est de 1644 ppm.

Les valeurs propres obtenues a l'issue du calcul de coeur en fonction des différents modules de calcul transport sont portées dans le tableau ci-dessous.

Module du calcul de transport	Eurydice Roth	Eurydice Roth x4	Eurydice DP00
Valeur propre	1,00507	1,00352	1,00318
$\Delta\varepsilon$ (pcm)	-59	-213	-265
$\Delta\varepsilon$/efficacité	+1,4 %	+5 %	+6 %

L'efficacité des crayons de hafnium est ici de 4208 pcm.
Comme dans les cas précédent nous observons une dérive de la valeur propre en fonction des différentes options. Elle est ici plus importante, puisque liée à une efficacité des crayons qui est plus grande.

VII CONFIGURATION AVEC POISONS COUPLES

La configuration dont il sera question dans ce paragraphe est la configuration avec 8 crayons de hafnium couplés (4 dans 2 assemblages) (chargement 346 - voir § 1.3).

7.1 Calculs effectués

Pour traiter le crayon absorbant dans son environnement avec le module de transport Eurydice, nous utiliserons la géométrie multicellule décrite ci-dessous

							13
						10	13
					2	9	13
				7	8	10	13
			1	6	8	10	13
		3	4	5	2	9	13
	12	12	12	11	8	10	13
13	13	13	13	13	13	13	13

Cellule N° 1 et 2 : Crayons hafnium
Cellule N° 3 et 13 : Crayons UO_2

7.2 Résultats

7.2.1. Effets en réactivité

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

Le titre en bore pour cette configuration est de 1685 ppm, ce qui nous donne une efficacité de 3890 pcm.

Module du calcul de transport	Eurydice Roth	Eurydice Roth x4	Eurydice DP00
Valeur propre	1,00525	1,00381	1,00349
$\Delta\varepsilon$ (pcm)	-41	-184	-216
$\Delta\varepsilon$/efficacité	+1,0 %	+4,0 %	+5,0 %

La dérive sur la valeur propre est très légèrement inférieure à celle du paragraphe précédent. Ceci est à lié à une efficacité un peu plus faible que pour la configuration N° 345.

7.2.2 Distribution de puissance

Les distributions de puissances expérimentales et calculées sont portées dans les tableaux suivants.

Les remarques faites pour la configuration N° 344 (§ 5.3.2) sont encore valables :

. Les écarts en relatifs d'un crayon à l'autre dans la zone situé à l'intérieur des 4 crayons de hafnium diminuent lorsque l'option de calcul est plus précise.
Ces écarts sont de l'ordre par exemple de 2,3 % avec l'option Roth (crayons M4 et N4), et ils ne sont plus que d'environ 1 % avec l'option DP00.

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.487 1.471 +1.1
J								
K			HF			1.260 1.233 +2.2		
L				0.959 0.968 -0.9	HF			
M				0.982 1.012 -3.0	0.949 0.967 -1.9			
N			HF	0.957 0.964 -0.7		HF		
O								
P	1.095 1.075 +1.9							

CONFIGURATION N°346-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL DE TRANSPORT:EURYDICE ROTH)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.487 1.467 +1.4
J								
K			HF			1.260 1.226 +2.8		
L				0.959 0.979 -2.0	HF			
M				0.982 1.014 -3.2	0.949 0.978 -3.0			
N			HF	0.957 0.965 -0.8		HF		
O								
P	1.095 1.061 +3.2							

CONFIGURATION N°346-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL DE TRANSPORT:EURYDICE ROTHX4)

	1	2	3	4	5	6	7	8
I		EXPERIE CALCUL E-C/C						1.487 1.453 +2.3
J								
K			HF			1.260 1.218 +3.4		
L				0.959 0.989 -2.9	HF			
M				0.982 1.015 -3.2	0.949 0.987 -3.9			
N			HF	0.957 0.977 -2.0		HF		
O	--					--		
P	1.095 1.051 +4.2							

CONFIGURATION N°346-DISTRIBUTION DE PUISSANCE
(MODULE DU CALCUL DE TRANSPORT:EURYDICE DP00)

. Ici aussi, nous assistons à un basculement entre la région centrale (entre les absorbants) et la périphérie. Celui-ci est plus important avec l'option DP00 (environ 7 %) qu'avec l'option Roth (de l'ordre de 4 %). Comme précédemment les valeurs calculées dans la zone périphérique sont inférieures à l'expérience, alors qu'elles sont supérieures dans la zone centrale.
Le basculement est plus important que pour la configuration N° 344.

D'autre part nous avions constaté avec celle-ci que la distribution de puissance azimutale autour du crayon absorbant s'améliorait en fonction des options de calcul. Ici, on peut voir que pour le crayon de hafnium L5, il n'en est pas de même. En effet les écarts avec le crayon K6 ne diminuent pas, et la valeur calculée reste pour ce crayon toujours inférieure à l'expérience.

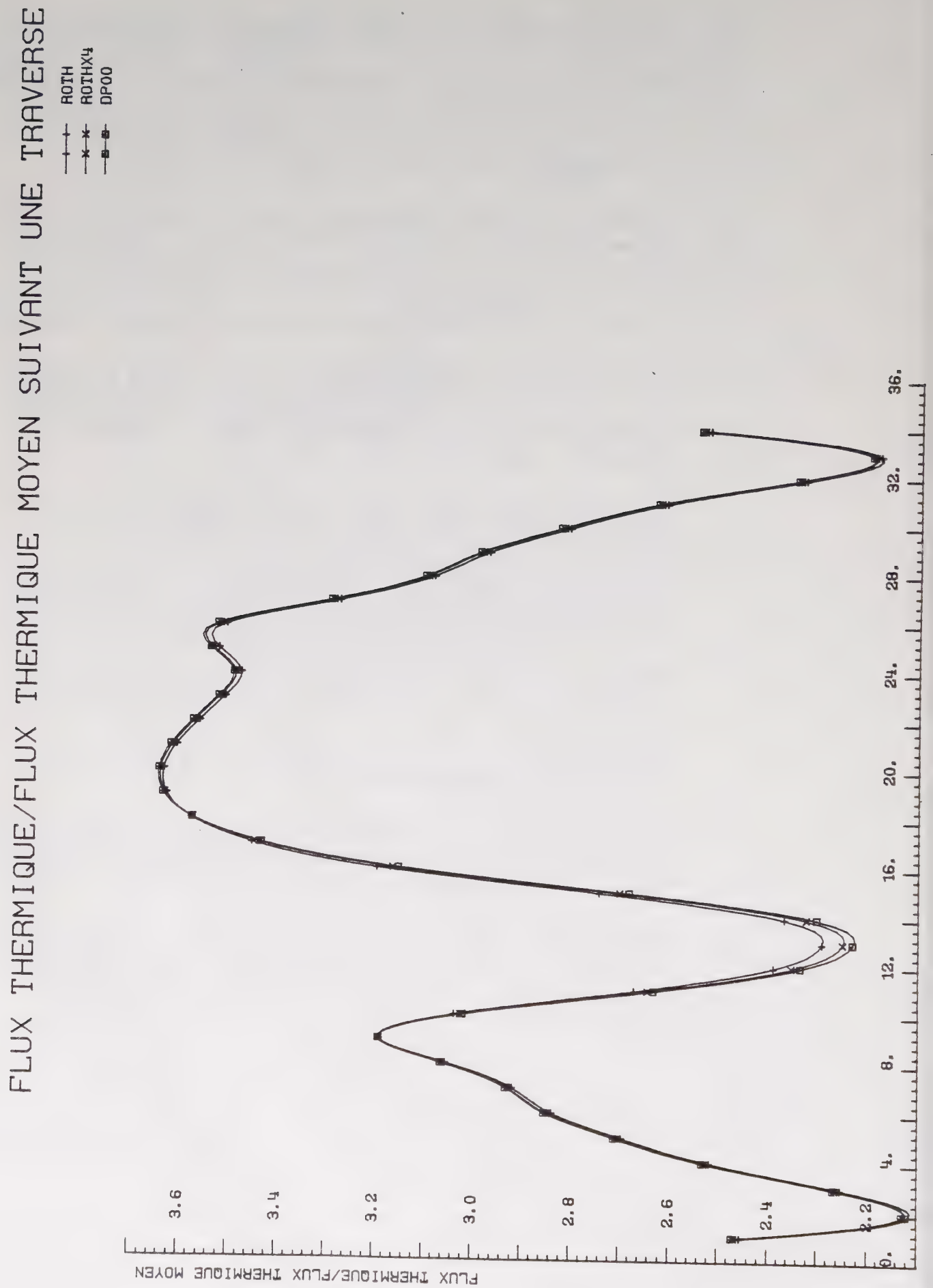
Nous constatons que les effets rencontrées lors de l'étude de la configuration N° 344, se retrouvent ici mais de manière amplifiée. Ceci est à relier bien sûr à une efficacité des absorbants plus grande, mais également à la configuration géométrique du coeur pour ce chargement.

Les sources d'erreurs sont les mêmes ici, mais accentuées car le motif du calcul de transport est encore moins réaliste, puiqu'aucune des quatres conditions de réflexion n'est vérifiée. En effet, il n'existe pas de plan de symétrie dans le coeur pour cette configuration. Les crayons de hafnium sont disposés dans deux assemblages diagonalements opposés. (On peut voir sur la figure ci-après, où est représenté, à titre d'illustration, le flux thermique suivant une traverse sur le coeur (traverse L), l'absence totale de symétrie, par rapport au plan médian, de la distribution de flux).

Comme précédemment, il n'est alors pas étonnant d'enregistrer des écarts (ou basculement) entre expérience et calcul.

Ceux-ci ne sont pas à lier directement au calcul local de la structure fine du flux dans et autour du poison (calcul Apollo), mais plûtot à l'ensemble de la méthode de calcul retenue.

Toutefois la plus ou moins grande précision du calcul de l'absorbant dans son environnement peu légèrement augmenter ou diminuer ces écarts, le plus souvent en détruisant (pour les calculs les plus fins) une compensation entre plusieurs erreurs.


FLUX THERMIQUE/FLUX THERMIQUE MOYEN SUIVANT UNE TRAVERSE
AOTH
AOTHX4
DP00
FLUX THERMIQUE/FLUX THERMIQUE MOYEN
3.6
3.4
3.2
3.0
2.8
2.6
2.4
2.2
0.
4.
8.
12.
16.
20.
24.
28.
32.
36.

7.3 Test sur les sections efficaces du hafnium

Comme pour le cas du rideau de hafnium (partie A), nous avons déterminé l'importance de l'autoprotection des résonance thermiques (pic à 2,38 eV et 1,098 eV) du hafnium, pour la géométrie différente des crayons. Pour cela on a procédé de manière identique, et les résultats obtenus sont exposés ci-dessous.

Au niveau du calcul multicellule Apollo, on a les taux d'absorption suivant pour les crayons de hafnium.

Groupe	Taux d'absorption (section non corrigées)	Taux d'absorption (section corrigées)
1	.0040	.0040
2	.0521	.0523
3	.9439	.9437
4	.6041	.6063
Total	1.6041	1.6063

Le calcul du coeur conduit à une valeur propre de 1,00349. La valeur propre avec des sections non modifiées est de 1,00342. L'effet de l'autoprotection des résonances thermique du hafnium entraîne une augmentation de la valeur propre de 6 pcm, soit une variation d'efficacité de - 0,15 %.

On voit que cet effet est négligeable pour les crayons de hafnium utilisés dans ces essais.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Nous retrouvons dans ce chapitre, avec l'étude d'absorbant à base de hafnium, les principales conclusions du chapitre précédent.

Les résultats obtenus pour le coeur à plaques, bien que devant être confirmés par des mesures définitives, montrent la bonne aptitude de notre schéma à restituer les effets d'absorbants à 1 dimension. On notera aussi l'obtention d'un bon rapport coût / précision par la méthode de synthèse axiale.

En ce qui concerne le coeur à crayons, l'analyse des résultats fait apparaître une similitude avec ceux que nous avions obtenus sur les configurations avec crayons d'UO_2-Gd_2O_3 étudiées au chapitre précédent.

Les écarts sur l'efficacité calculée atteignent un maximum de 5 %. Comme nous l'avons montré lors de l'interprétation des réseaux avec Gd, il est très probable que cette dérive soit à imputer plus au calcul du coeur dans son ensemble qu'a l'absorption du hafnium lui-même.

Pour confirmer cette hypothèse une interprétation mettant en oeuvre un calcul de transport au niveau du coeur eut été nécessaire.

Le coût très élevé d'un tel calcul a rendu prohibitive cette démarche qui en outre aurait contribuer à qualifier un schéma différent de celui qu'on utilise pour les projets.

CONCLUSION GENERALE

L'interprétation d'expériences critiques contenant des absorbants à base de Hafnium et de Gadolinium nous a permis de progresser dans la connaissance du schéma de calcul neutronique envisagé actuellement pour les réacteurs à eau légère et de contribuer à sa qualification.

Le résultat d'un calcul est fonction à la fois :

- de la précision avec laquelle on connait les données de base,
- de la modélisation qui permet de passer de ces paramètres fondamentaux aux résultats intégraux tels que le coefficient de multiplication et les distributions de puissance.

Dans le cas particulier des hétérogénéités absorbantes, que sont les poisons consommables en début de vie ou les éléments de contrôle, les résultats expérimentaux sont peu sensibles à une variation des sections efficaces. C'est donc surtout sur les aspects méthodes de calcul que l'on peut tirer partie des informations obtenues.

Le dépouillement des essais réalisés dans la pile AZUR pour des réseaux contenant du Hafnium et du Gadolinium nous a permis d'aborder la qualification des schémas de calcul pour les deux grandes familles de réacteurs à eau pressurisée.

Tout d'abord, en ce qui concerne les réacteurs à plaques, sur des situations très simples constituées par une succession de plaques parallèles, on confirme l'aptitude du schéma de calcul pour la restitution de l'efficacité des absorbants et des distributions de puissance.

Par rapport aux premières interprétations on montre dans le cas des lattes d'alumine gadoliniée que l'amélioration dans la précision obtenue est directement fonction de la finesse avec laquelle on représente le détail de la géométrie dans le calcul de la structure fine du flux.

En décrivant explicitement toute les hétérogénéités à une dimension on calcule l'efficacité des lattes d'alumine gadoliniée à mieux d'1 % près ce qui correspond à l'incertitude sur les variations des titres critiques mesurés par dosage chimique.

Dans le cas des lattes de Hafnium, les écarts sur l'efficacité varient légèrement avec l'épaisseur des rideaux introduits au centre du coeur. Ils atteignent un maximum d'environ 5 %. Il faut cependant préciser que les calculs ont été effectués avec des titres en bore estimés, divers problèmes techniques ayants retardés la publication des résultats définitifs.

L'efficacité d'un "rideau creux" comportant une lame d'eau entre deux lattes de Hafnium semble bien calculée. Les configurations avec les absorbants Hafniés partiellement enfoncés montrent l'intérêt de l'utilisation des calculs de synthèse qui permettent pour un coût relativement modeste de restituer très correctement les effets à trois dimensions.

Afin de compléter ces premières analyses, nous avons repris pour les deux mêmes types d'absorbants l'interprétation des expériences AZUR sur un réseau à barreaux "CAP 1800".

Les différences essentielles par rapport aux configurations étudiées précédemment résident hormis, bien sûr, le type de combustible dans les points suivants :

. Le gadolinium est présent sous la forme d'un oxyde mixte (UO_2 Gd_2O_3).

. Les perturbations induites par les crayons empoisonnés ont un caractère bidimensionnel.

Ces expériences ont été interprétées en 1976. Depuis de nombreux développements ont été apportés tant sur les bibliothèques que sur les modèles de calcul.

La confrontation de nos résultats avec les mesures nous a permis de mettre en évidence les points suivants :

La précision avec laquelle on calcule les effets dus à la présence d'absorbants localisés dépend directement de la finesse avec laquelle on traite l'intéraction de l'absorbant et de son voisinage.

C'est ainsi que pour les poisons gadoliniés, on montre qu'avec le module multicellule le plus simple (hypothèse ROTH) l'imprécision sur la distribution locale de puissance peut atteindre 3 à 4 %. En revanche les modules plus perfectionnés conduisent à des résultats compris dans la fourchette d'incertitude expérimentale ($\pm$ 1 %) (sous réserve, comme l'a montré l'étude des configurations avec crayons de hafnium, que l'on puisse représenter de manière suffisamment détaillée et étendue le motif multicellule de base).

De manière générale, la perte de réactivité due à l'absorbant est mesuré par différence de titre en bore critique. En fait, contrairement à ce qui est habituellement dit, il n'est pas fait une stricte équivalence entre bore soluble et poison. Une partie seulement de la réactivité introduite par dilution du bore est compensée par l'absorption du poison ; le reste correspond à une augmentation des fuites due à la redistribution macroscopique du flux.

L'efficacité d'un absorbant est calculée par comparaison des valeurs propres des différentes configurations. Puisque la valeur propre est le résultat du calcul de coeur dans son ensemble, les écarts enregistrés sur celle-ci peuvent être dues bien sûr au calcul local de l'absorbant, mais aussi à celui des fuites.

L'interprétation par un calcul de transport du coeur dans sa totalité pour les configurations CAP 1800 N° 340 (référence) et N° 341 (4 crayons d'UO_2-Gd_2O_3) a montré que la dérive de valeur propre obtenue par les calculs de diffusion n'est pas à relier à une détermination insatisfaisante de l'absorption dans le Gadolinium. L'erreur commise sur le calcul du taux de fuite en est la cause essentielle.

L'interprétation d'expériences sur des petits coeurs doit donc se faire avec précaution. En particulier, on ne peut pas se contenter de comparer des résultats globaux (valeurs propres) et de reporter les éventuels écarts sur une mauvaise prise en compte de l'absorption dans le poison, car l'importance des fuites est très grande.

En effet le calcul du coeur en transport, permettant de déterminer correctement les taux de fuite, restitue parfaitement l'efficacité de l'absorbant.

Il est donc logique de recommander, pour des configurations comparables aux notres, l'utilisation d'un code de transport pour traiter le coeur dans sa totalité.

Mais il est bien évident que pour des raisons de coût il est difficile d'envisager une généralisation d'une telle procédure.

Le développement d'une méthode d'équivalence pour le calcul des constantes de réflecteur permettrait sans doute de résoudre ce problème. Celle-ci, actuellement à l'étude, est basé sur le respect des courants neutroniques aux interfaces coeur réflecteur. A l'aide de ces constantes équivalentes un calcul de diffusion restiturait les fuites avec une précision comparable à celle d'un calcul de transport, mais pour un coût beaucoup moins élevé et compatible avec des études de projet.

Dans ces conditions, pour les coeurs en début de vie, nous disposons maintenant d'outils de calculs et de méthode aptes à restituer les distributions de puissance locales et les effets en réactivité liés à la présence d'absorbants localisés.

Dans la poursuite des travaux, l'étude de poisons en grain doit être abordée (des expériences sont prévues à cet égard).
L'effort principal doit maintenant porter sur :

. tout d'abord, en ce qui concerne les réseaux à plaques, la qualification des modules de calcul à 2 dimensions. On traitera dans un premier temps des géométries simplifiées (programme préparé) pour aller progressivement vers les véritables géométries à faisceaux.
. et l'étude du schéma de calcul en évolution, qui permettra en outre une amélioration des connaissances sur les données de base.

REFERENCES

[1] D.CAER et Al
Neptune : un système modulaire pour le calcul des réacteurs à eau.
Note technique CEA - SERMA/SPM N° 228 "DR" (1979)

[2] G. BRANDICOURT
Mode d'utilisation du programme de transport aux ordonnées discrètes à deux dimensions DOT 3.
Rapport CEA - SERMA/S N° 224

[3] A. HOFFMAN, F. JEANPIERRE , A. KAVENOKY, M. LIVOLANT, M. LORAIN
Apollo, code multigroupe de résolution de l'équation du transport pour les neutrons thermiques et rapides.
Note CEA - N - 1610 (1973)

[4] J. MONDOT
Equipage : détermination des constantes équivalentes pour les calculs de diffusion aux différences finies en géométrie X, Y.
Note technique CEA - SEN/LPN N° 77/031 (1977)

[5] G. POURTOYAN
Compte rendu d'essais AZUR
Note technique CEA TA/DE/SAZ 79/021 (1979)

[6] G. NAUDAN
Irradiations de plaques d'alumine gadoliniées dans un coeur "caramels" d'AZUR
Note technique CEA SEN/LPN N° 096 CD (1979)

[7] J. MONDOT - J.C. DAUGES
Expérience AZUR - CARAMEL - Interprétation des essais sur la configuration de référence avec le schéma NEPTUNE
Note technique CEA SEN/LPN N° 160 (1980)

[8] Configurations de référence et Gadolinium
Compte rendus d'essais AZUR
Note technique CEA - TA/DE 75/929

[9] P. BIOUX - J.B. THOMAS
Interprétation des expériences "AZUR-CAP 1800"
Coeur quatre éléments avec différents types d'absorbants
Rapport CEA SEN N° 27

[10] A. HEBERT
Développement de la méthode SPH :
Homogénéisation de cellules dans un réseau non uniforme et calcul des paramètres de réflecteur
Thèse Orsay 1980

[11] R. SANCHEZ
Schémas approchés de résolution de l'équation intégrale du transport à deux dimensions
Thèse Orsay 1979

[12] G. GRANGET - A. SANTAMARINA
Expérience Mélodie IV
Configuration avec un ilot de 16 crayons d'UO_2-PuO_2, résultats et interprétation
Note technique CEA - SEN/LPRE N° 78-69

[13] P. CHAUCHEPRAT
Contribution à la qualification du Gadolinium dans les réacteurs à eau
Thèse Orsay 1982 à paraître

[14] M. NASR
Etude des poisons consommables et qualification du Gadolinium dans les réacteurs à eau
Thèse Orsay 1977

[15] G. GRANGET - A. SANTAMARINA
Calcul des assemblages PWR avec grappe de contrôle
Qualification sur des expériences Mélodie dans Minerve
Note technique CEA - SEN/LPRE N° 79-94

[16] J. BUSSAC - P. REUSS
Traité de neutronique
Hermann, Paris 1978

[17] P. PASCAL
Traité de chimie minérale Tome IX
Masson et Cie

[18] "Engineering Test Reactor"
Arco (Idaho)

[19] M. OUETIER
Matériaux absorbants
Note CEA - N - 2060 (1978)

[20] Compte rendu d'Essais AZUR
à paraître

[21] J. MONDOT - P. THEROND
Expériences AZUR - CARAMEL II
Calculs préliminaires pour les réseaux 1D
Note technique CEA SEN/LPN N° 162 (1980)

[22] J. TAXY
Communication personnelle

[23] P. REUSS - M. TELLIER
CEA - SERMA - SPM

[24] J.C. GUYOT - J. MONDOT
Autoprotection et élargissement Doppler des résonances thermiques du hafnium
Note technique CEA SEN/LPN N° 198

[25] R. WILZER
Croix de contrôle en Hafnium, creuses et remplies d'eau dans un "coeur embarqué" :
Etude paramétrique
Note technique CEA - SEN/LPN 77/030

[26] Compte rendu d'essais AZUR
Coeur quatre éléments crayons UO_2 type CAP 1800
Etude de configurations avec crayons Hafnium
Note technique CEA - TA/DE 76/139

ANNEXE A

EMPOISONNEMENT HOMOGENE AU BORE DES RESEAUX A EAU LEGERE

DOSAGE PAR MESURE CHIMIQUE DU TITRE EN BORE CRITIQUE

L'empoisonnement homogène d'un modérateur par un absorbant soluble, peut être utilisé dans un réacteur de puissance pour faire face aux variations lentes de réactivité (dûes en particulier à l'usure du combustible), et au passage de froid à chaud.

Le poison soluble peut être, dans les expériences critiques, utilisé également comme intermédiaire de mesure. Dans ce dernier cas, le seul qui nous interresse ici, on peut en particulier comparer l'anti-réactivité d'éléments absorbants.

En effet l'étude des coeurs dans Azur se fait par équivalence (en fait nous avons une pseudo-équivalence) entre poison soluble et absorbants. On étudie toute sorte de coeurs avec ou sans hétérogénéité, chacune des configurations étant ajustée à la valeur critique par dilution ou adjonction de solution empoisonnée.

I GENERALITES SUR LA METHODE D'EMPOISONNEMENT

L'empoisonnement homogène est intéressant car il évite les pics de puissance que pourraient entraîner des barres de contrôle. Le poison doit être soluble, avoir une grande section efficace de capture pour les neutrons et être stable sous l'effet de la température et des rayonnements.

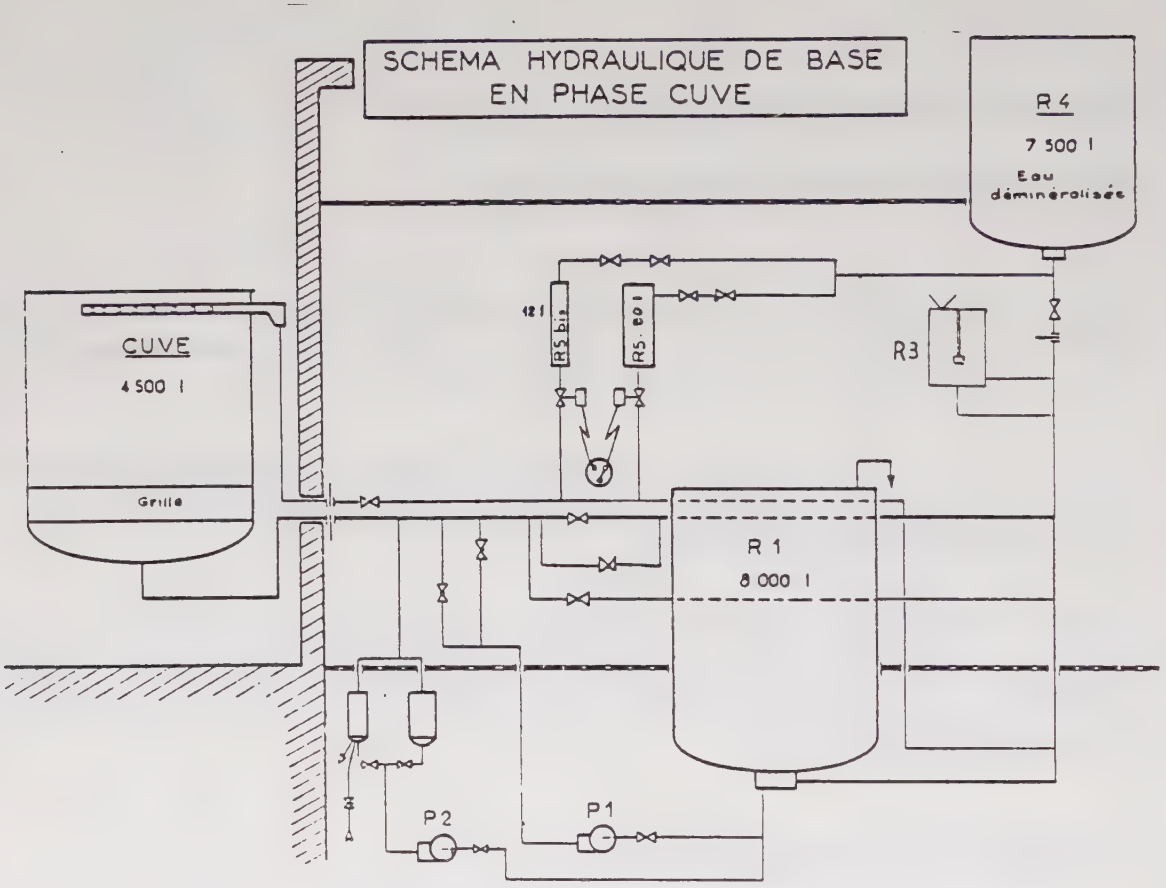
C'est le bore qui est utilisé sous forme d'acide borique H_3BO_3.

°C	g H_3BO_3 / 100 g H_2O
0	2,6
20	4,9
40	8,7
60	14,8
80	23,6
100	39,7

Solubilité de H_3BO_3 en fonction de la température

La densité de l'acide borique est de 1,44 à 20°C ; sa concentration est variable de 0 à 4000 mg/l.

Nous allons maintenant présenter succintement les circuits de la pile Azur permettant de borer l'eau du modérateur. Ci-dessous nous trouvons le schéma hydraulique de base de la pile Azur en phase cuve



Nous commentons rapidement ce schéma.

Le coeur repose sur la grille dans la cuve. Le réservoir R1 est destiné à recevoir toute l'eau de la cuve lors de la vidange. Le réservoir R4 contient l'eau déminéralisée destinée à remplir la cuve. Diverses pompes font circuler l'eau dans tout le circuit.

Plus précisément la boratation et la dilution se font à l'aide des réservoirs R3, R5 et R5 bis.

R5 et R5 bis permettent d'introduire de l'eau dans la cuve pour dilution (lorsque la concentration en bore est trop élevée pour rendre le coeur critique). Si on veut augmenter la quantité de bore dans le modérateur, on introduit l'acide borique sous forme solide dans le réservoir R3 contenant de l'eau. Un agitateur et une résistance chauffante permet d'obtenir une solution homogène et d'éviter tout dépot de bore avant l'injection dans le circuit.

II GENERALITES SUR LA METHODE DE MESURE DU TITRE EN BORE

La détermination du titre en bore est basée sur une méthode de neutralisation de l'acide borique.

2.1 Neutralisation acide - base

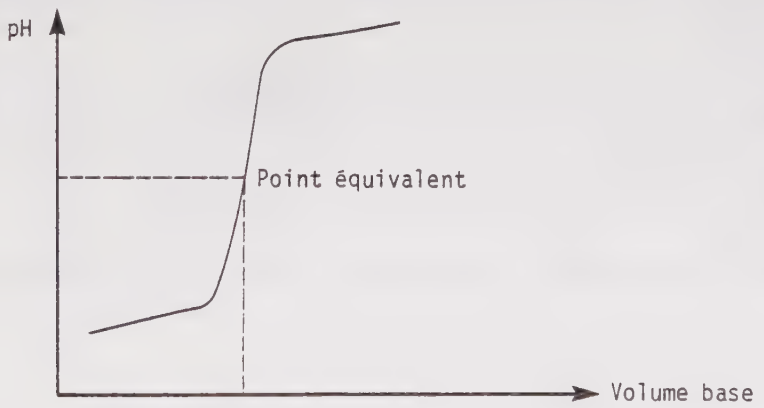
L'équation de base d'une réaction de neutralisation acide - base est la suivante :

$$H^+ + OH^- \rightleftarrows H_2O$$

On peut d'après cette méthode, en se servant d'une solution titrée d'un acide quelconque, procéder à la détermination quantitative des bases, ou, ce qui nous intéresse ici, en se servant d'une solution titrée d'une base, on peut doser quantitativement les acides.

On titre la solution d'un acide quelconque par la solution d'une base, les ions OH^- de cette base se combinent aux ions H^+ de l'acide et la concentration des ions H^+ diminue progressivement, tandis que le pH ($pH = - \log [H^+]$) augmente. Pour une valeur déterminée du pH, on atteint le point équivalent, et l'addition de base doit être interrompue.

Nous traçons ci-dessous, à titre d'exemple, la courbe représentant la variation du pH de la solution en fonction de la quantité de solution basique introduite lors du dosage d'un acide (cette courbe est en fait représentative de la neutralisation d'un acide fort par une base forte).



On voit donc que connaissant au point équivalent, le volume de base (le nombre de moles) introduit, on déduit avec la réaction de neutralisation le nombre de moles d'acide présent dans la solution. Ainsi dans notre cas, on détermine la quantité de bore dans l'échantillon dosé.

La mesure du pH, et donc la détermination du point équivalent, se fait en général à l'aide d'un pH mètre qui mesure la différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans la

solution à dosée.

2.2 Problèmes lié au bore

L'acide borique est trop faible pour pouvoir être dosé par acidimétrie avec une précision suffisante (pH de la solution 0,1 N = 5,1 à 20°C ; un acide est d'autant plus fort que son pH est inférieur à 7). Il donne avec les oses et les polyols (par exemple : Mannitol, Levulose, Glycérine) des complexes à fonction acide nettemment plus forte.

L'acide borique sera transformé en un complexe acide fort qui sera dans notre cas titré par une solution de soude. La lévulose qui ne donne pas le complexe acide le plus fort, a été choisie pour sa grande solubilité et la possibilité d'une obtention à l'état de haute pureté.

III PRINCIPE DE DOSAGE ET INCERTITUDE ASSOCIEE

Doser l'acide borique complexé revient en fait à mesurer le poids de bore présent dans l'échantillon.

La méthode employée à Azur consiste à mesurer toujours la même quantité de bore. Pour cela on doit connaître le titre approximatif de la solution (il est calculé par les expérimentateurs lors du prélèvement) et ainsi en jouant sur le volume de l'échantillon que l'on dose on est à même de mesurer toujours le même poids de bore.

A Azur on dose des solutions contenant 2 mg de bore. Ces 2 mg de bore sont complexés par 50 g de levulose.

La neutralisation se fait avec de la soude ($\frac{N}{20}$) (le volume de soude nécessaire sera donc d'environ 3,8 cm^3).

Le résultat obtenu pour le titrage peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$R = \frac{V.\ N.\ F.\ K.}{P}$$

avec
- V : volume de soude
- N : normalité de la soude
- F : facteur d'ajustement
- K : coefficient lié au dispositif (constant)
- P : poids de la solution dosée.

La seule variable à déterminer préalablement à une campagne de mesure est le facteur F. Ceci est fait à l'aide d'un échantillon de référence.

Cette référence est fabriquée par les expérimentateurs, qui dissolvent 2 mg de bore avec le poids d'eau nécessaire pour obtenir un titre fixé à l'avance. Après complexion, on dose cette solution par la soude, on étalonne ainsi l'appareillage et on détermine F, (ce dosage est réalisé plusieurs fois pour vérifier que l'on retrouve bien avec le facteur F calculé le titre que l'on s'est fixé en fabriquant la référence).

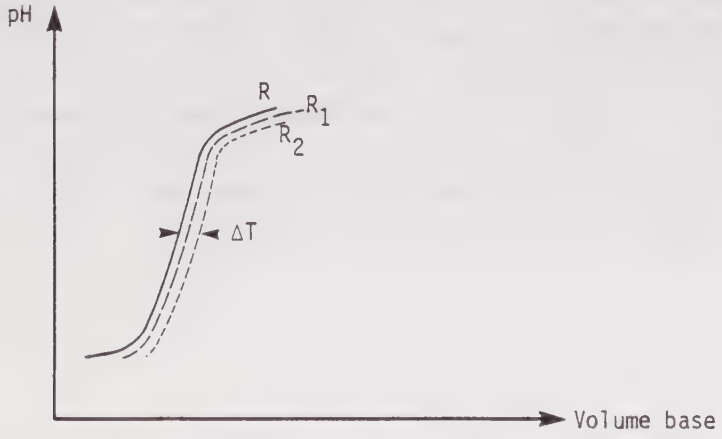
On constate qur l'étalonnage se fait en fonction de la référence, de l'appareillage et aussi de la solution de soude qui sera la même pour toute la campagne de mesure (on élimine ici une source d'erreur qui pourrait être liée à une éventuelle imprécision sur le titre de la soude).

Après cette première opération, on peut passer au dosage proprement dit de nos échantillons.

On voit, compte tenu de la méthode qui consiste à doser toujours la même quantité de bore, que l'incertitude expérimentale va être considérablement diminuée, par rapport à une mesure unique en absolu, puisque on se place toujours dans la même situation pour la mesure.

La courbe de neutralisation que l'on obtient va toujours être la même (ou très légèrement différente) pour la référence et tous les échantillons.

L'imprécision sur la mesure du titre ne porte en quelque sorte que sur l'écart (ΔT) entre les courbes de neutralisation que l'on obtient. Cet écart étant petit, l'incertitude sera faible.



A titre d'illustration nous avons porté sur cette figure, les courbes de neutralisation de deux échantillons R1, R2 et de la référence R, que l'on peut obtenir avec la méthode décrite précédemment.

On voit, en fait, que nous effectuons des mesures qui ne sont pas indépendantes, et que l'incertitude porte sur les légers écarts que l'on obtient par rapport à la référence.

Tous les échantillons sont dosés au moins 2 fois. Si on a les échantillons R1 à RN, on va d'abord doser les échantillons R1, R2 jusqu'à RN. Le deuxième dosage se fera en commençant par RN, puis R (N-1) jusqu'à R1. Ainsi toute erreur qui pourrait être due (ou masquée) à la reproduction et à la succession des mêmes mesures est éliminée.

Globalement grâce à la procédure retenue, les sources d'erreur et d'incertitude sont réduites au minimum, puisque ce dosage consiste à mesurer une correction.

C'est-à-dire aux deux pesées que l'on effectue :
. pour la préparation de la référence
. pour la pesée de l'échantillon à doser.

Avec les balances dont on dispose aujourd'hui, la précision obtenue est très grande. Celle-ci sera encore améliorée en relatif puisque toutes les pesées sont en fait des mesures liées.

Les incertitudes liées au dosage lui-même sont quant à elles, avec la démarche adoptée, très faibles. Celles-ci ont encore été diminuées par l'acquisition à Azur d'un appareillage automatisé et programmé alliant un pH mètre, une burette automatique d'une très grande précision et un calculateur électronique programmé régissant le fonctionnement de l'ensemble.

Ceci permet aux expérimentateurs d'annoncer une incertitude, en relatif, pour les titres en bore de 0,2 à 0,3 %.

Pour les dosages effectués sans le nouvel appareillage, c'est-à-dire ceux concernant les essais interprétés dans cette thèse, mais suivant la même méthode, l'incertitude est de l'ordre de 0,5 % à 0,6 %.

Cette fourchette d'incertitude est à appliquer, comme nous l'avons vu, à l'écart entre les différents titres (donc a la pseudo efficacité mesurée des absorbants) ; sous réserve de la bonne représentativité du prélèvement et de l'homogénéité de la solution dans le circuit.

IV APPLICATION AUX ESSAIS INTERPRETES

Dans le tableau qui suit, nous récapitulons les incertitudes pour les différentes campagnes d'expériences étudiées.

Essais	Date	Titre de la configuration de référence	Efficacité (en ppm de bore) moyenne des différents absorbants	incertitude (en ppm) sur l'efficacité
AZUR Caramel plaque gadolinium	1979	1249	$\sim$ 400 à 600	$\sim$ 2 à 4
AZUR CAP 1800 barreaux d'UO_2-Gd_2O_3	1975	2180	$\sim$ 200 à 600	$\sim$ 1 à 4
AZUR CAP 1800 barreaux de Hafnium	1975	2180	$\sim$ 400 à 600	$\sim$ 2 à 4
AZUR Caramel II plaque Hafnium	1982	1249	$\sim$ 400 à 700	(*)

(*) : comme il a été dit dans le chapitre III, nous ne disposons que de résultats estimés (compte tenu de problèmes techniques ayant retardé la publication des résultats définitifs). Il est donc impossible de fournir une fourchette d'incertitude expérimentale.

En conclusion, nous pouvons dire que toutes les efficacités d'absorbants présentés dans cette thèse sont connues à 0,5 à 0,6 % près. (Sauf, bien entendu, pour la dernière campagne d'essais).

UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

3244

PERMIS D'IMPRIMER

Doctorat 3° CYCLE

Thèse de PHYSIQUE NUCLEAIRE

Nom THEROND

Prénoms Patrice, André

Date et lieu de naissance 29 novembre 1956 à BRIOUDE (Haute Loire)

SUJET :

Thèse : Contribution à la qualification d'un schéma de calcul pour les réacteurs à eau pressurisée, appliqué à des absorbants à base de gadolinium et de hafnium.

UNIVERSITÉ PARIS-SUD ★ ORSAY

Vu et approuvé :

Orsay, le 18 juin 1982

Les Membres du Jury.

Ce document doit être remis à l'étudiant à l'issue de la soutenance.

Imprimé par le Bureau de Documentation du CEN/ CADARACHE